

**Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ»**

На правах рукописи

Короткова Виктория Игоревна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЗАДЕРЖЕК ПАКЕТОВ
ИНФОРМАЦИИ В ОЧЕРЕДЯХ КОММУТАТОРОВ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ
СЕТЕЙ ДОСТУПА**

Специальность 2.2.15 — Системы, сети и устройства
телекоммуникаций

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, профессор
Пшеничников Анатолий Павлович

Москва — 2026 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ СЕТЕЙ ДОСТУПА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕХ КОНЦЕПЦИЙ МСЭ-Т РАЗВИТИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ	13
1.1. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ СЕТЕЙ ДОСТУПА В КОНЦЕПЦИИ МСЭ-Т «СЕТИ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ – NGN».....	13
1.2. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ СЕТЕЙ ДОСТУПА В КОНЦЕПЦИИ МСЭ-Т FN (FUTURE NETWORKS) - «БУДУЩИЕ СЕТИ».....	25
1.3. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ СЕТЕЙ ДОСТУПА В КОНЦЕПЦИИ МСЭ-Т «СЕТЬ 2030 – NETWORK 2030»	30
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1	40
2. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ УЗЛА ДОСТУПА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СВЯЗИ.....	42
2.1. РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ШЛЮЗАХ УЗЛА ДОСТУПА	42
2.2. АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ В ПАКЕТНЫХ КОММУТАТОРАХ.....	45
2.3. АНАЛИЗ СПОСОБОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ПАКЕТОВ В ОЧЕРЕДЯХ КОММУТАТОРА	49
2.4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАКЕТОВ В ОЧЕРЕДЯХ КОММУТАТОРА.....	58
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2	65

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ НЕНОРМИРОВАННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ОПРОСЕ ПРИОРИТЕТНЫХ ОЧЕРЕДЕЙ В КОММУТАТОРЕ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО УЗЛА ДОСТУПА	66
3.1. СТРУКТУРА И КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОЛЛИНГА	66
3.2. КРАТКИЙ АНАЛИЗ РАБОТ ПО СТОХАСТИЧЕСКОМУ ПОЛЛИНГУ	69
3.3. ИТЕРАЦИОННАЯ СХЕМА РАСЧЁТА СТАЦИОНАРНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ U_I ОПРОСА ОЧЕРЕДЕЙ Q_I , $I = 1, N$ И СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ЦИКЛА C	70
3.4. МЕТОД РАСЧЁТА СРЕДНЕГО ЧИСЛА ЗАЯВОК L_I В ОЧЕРЕДИ Q_I , $I = 1, N$	77
3.5. ОЦЕНКА НЕНОРМИРОВАННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПАКЕТОВ В ОЧЕРЕДЯХ ..	80
3.6. СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА НЕНОРМИРОВАННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПАКЕТОВ ИНФОРМАЦИИ В ОЧЕРЕДЯХ КОММУТАТОРОВ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ УЗЛОВ ДОСТУПА..	82
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3	83
4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО УЗЛА ДОСТУПА НА НЕНОРМИРОВАННЫЕ ЗАДЕРЖКИ ПАКЕТОВ ИНФОРМАЦИИ В ОЧЕРЕДЯХ КОММУТАТОРОВ В СИСТЕМЕ ПОЛЛИНГА ИЗ ТРЕХ ОЧЕРЕДЕЙ	85
4.1. РЕШЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ (3.6)-(3.9) ОТНОСИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕННЫХ , и , , В СИСТЕМЕ ПОЛЛИНГА ИЗ ТРЁХ ОЧЕРЕДЕЙ.....	85
4.2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ЭВМ НЕНОРМИРОВАННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПАКЕТОВ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОЛЛИНГА ИЗ ТРЁХ ОЧЕРЕДЕЙ.....	88
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	99
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ	108

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	112
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современный этап развития информационной инфраструктуры страны характеризуется цифровизацией всех информационных процессов в обществе. Активная интеграция информационно-коммуникационного оборудования формирует качественно новый уровень технологических решений – *инфокоммуникационные* технологии, инфраструктуру сетей и спектр соответствующих услуг. Наблюдается постоянное расширение номенклатуры предлагаемых информационных услуг, возрастает необходимость повышения надёжности и скорости обработки значительных объёмов передаваемых данных.

Реализация предоставления инфокоммуникационных услуг в пакетных сетях осуществляется посредством мультисервисных узлов доступа (MSAN - Multi-Service Access Node), позволяющих объединить различные услуги в одном устройстве и обеспечить передачу данных по единой IP-инфраструктуре. Это позволяет операторам существенно снизить капитальные затраты и одновременно внедрять инновационные сервисы для пользователей.

Важнейшим критерием оценки качества мультимедийных услуг выступает показатель временной задержки пакетов информации. В рекомендации МСЭ-Т G.114 (05/03) регламентируется величина задержки «от говорящего до слушающего». В мультисервисных узлах доступа на исходящей стороне соединительного тракта, помимо нормированной задержки пакетирования, возникают дополнительные ненормированные задержки, обусловленные формированием приоритетных очередей в сетевом оборудовании. Эти задержки могут значительно ухудшить уровень качества, поэтому при проектировании сетей необходимо учитывать эти дополнительные, ненормированные задержки.

Таким образом, выбранная тематика диссертационной работы, направленная на разработку метода оценки ненормированных задержек пакетов

информации в приоритетных очередях пакетных коммутаторов, приобретает особую значимость и актуальность.

Степень разработанности темы исследования. Анализ характеристик качества обслуживания мультимедийного трафика в мультисервисных сетях связи опубликован в работах отечественных авторов Ю. В. Гайдамаки [83], Б. С. Гольдштейна [5], В. М. Вишневого [63], И. А. Кочетковой [100], А. Е. Кучерявого [10], В. А. Нетеса [11], А. И. Парамонова [13], А. П. Пшеничникова [12], А. В. Рослякова [14], К. Е. Самуйлова [15], О. В. Семёновой [63], Н. А. Соколова [16], С. Н. Степанова [17], М. А. Шнепс-Шнеппе [18], В. П. Шувалова [90]; зарубежных авторов U. Black [19], S.C. Borst [65], J. M. Garcia [20], D. McDysan [21], D. Minoli [22], Takagi H. [61], F.A. Tobagi [23] и других.

Вместе с тем анализ научной литературы показывает, что ряд вопросов, связанных с оценкой задержек пакетов информации именно в мультисервисных узлах доступа с учётом особенностей формирования мультимедийного трафика, организации логического разделения потоков, особенностей обслуживания очередей и применения современных методов управления трафиком, остаётся недостаточно изученным.

Это подчёркивает необходимость дальнейшего совершенствования математических методов исследования подобных систем и разработки прикладных алгоритмов и программ, ориентированных на инженерные расчёты при проектировании сетей доступа.

Цель работы. Разработка метода оценки ненормированных задержек пакетов информации, возникающих при циклическом опросе приоритетных очередей пакетных коммутаторов мультисервисных узлов доступа.

Научная задача исследования заключается в создании теоретического и практического инструментария для оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей в пакетных коммутаторах мультисервисных сетей доступа.

Для достижения этой цели решены следующие **частные задачи**:

1. Систематизированы требования к сетям доступа в концепциях NGN, FN и Network 2030. Выявлены тенденции увеличения пропускной

способности разнородного обслуживаемого трафика и требования к задержке, а также обоснована необходимость оценки задержек пакетов в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа.

2. Разработаны функциональная и математическая модели узла доступа мультисервисной сети связи, учитывающие пакетизацию мультимедийных сообщений, организацию виртуальных локальных сетей в пакетных коммутаторах, размещение пакетов в очередях коммутаторов и процедуры их обслуживания.

3. Разработаны алгоритмы и программы для ЭВМ, обеспечивающие вычисления ненормированных задержек пакетов информации в приоритетных очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа.

4. Проанализировано влияние параметров трафика и систем поллинга на ненормированные задержки пакетов информации в мультисервисных узлах доступа.

Объектом исследования являются узлы доступа мультисервисной сети связи.

Предметом исследования является разработка метода оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей коммутаторов узлов доступа мультисервисных сетей связи.

Методология и методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решаются с использованием метода теории телетрафика, теории массового обслуживания, а также методы анализа средних длин очередей в системах поллинга, методы аналитического исследования, численного анализа и программной реализации расчетных процедур.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана функциональная модель узла доступа мультисервисной сети связи, которая в отличие от известных моделей позволяет учитывать совместное влияние следующих факторов: пакетизацию мультимедийных сообщений; организацию виртуальных

локальных сетей VLAN в пакетных коммутаторах; размещение пакетов информации в приоритетных очередях коммутаторов; процедуры обслуживания пакетов информации. Показано, что суммарные нормированные задержки голосовых пакетов информации «от говорящего до слушающего» составляют 200 мс, что в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.114 соответствует **хорошему** качеству обслуживания.

2. На основании построенной функциональной модели узла доступа разработана математическая модель и метод оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе сервером приоритетных очередей пакетных коммутаторов. В отличие от известных методов разработанный подход позволяет находить оценки задержек с приемлемой для инженерных расчётов погрешностью 3–5%.

3. Разработаны алгоритмическое и программное обеспечения для оценки ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей в пакетных коммутаторах мультисервисных узлов доступа. В отличие от известных методов алгоритмы и программа для ЭВМ позволили оценивать качество обслуживания голосового трафика («из конца в конец») «от говорящего до слушающего» с учётом ненормированных задержек пакетов информации.

4. С помощью разработанной программы для ЭВМ в примере системы поллинга из трёх очередей проведено исследование влияния параметров трафика и системы поллинга на средние значения ненормированных задержек пакетов информации. Вычисления на ЭВМ в примере из трёх очередей показали, что задержка голосовых пакетов в очереди составила более 10% от нормируемой задержки в рекомендации МСЭ-Т G.114, что снижает качество телефонной связи из «хорошего» в «приемлемое». Из этого следует необходимость использования разработанной программы при проектировании систем поллинга.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В результате анализа требований к сетям доступа в концепциях NGN, FN и Network 2030 установлено, что в период 2010-2030 гг. целевые скорости передачи в сетях доступа увеличиваются со 100 Мбит/с до 100 Гбит/с, а требования к суммарной задержке для критичных к задержке сценариев уменьшаются со 100 мс до 5 мс. Это обуславливает необходимость расчёта оценки ненормированных средних значений задержек пакетов информации в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа как переменной составляющей общей задержки передачи пакетов информации.

2. Функциональная модель узла доступа мультисервисной сети связи, учитывающая пакетизацию мультимедийных сообщений, организацию виртуальных локальных сетей VLAN в пакетных коммутаторах, размещение пакетов в очередях коммутаторов и процедуры их обслуживания, позволяет сформулировать задачу оценки средних задержек пакетов в мультисервисном узле доступа в терминах расчета соответствующих характеристик систем поллинга.

3. Разработанный приближённый метод анализа средних длин очередей системы поллинга позволяет вычислить с помощью ЭВМ ненормированные задержки пакетов информации в приоритетных очередях коммутаторов узлов доступа в примере из трёх очередей: задержки пакетов в очередях, обслуживающих голосовой трафик, трафик ВКС и ПД составили соответственно 24.407 мс, 14.63 мс и 6.69 мс. Показано, что ненормированные средние значения задержек голосовых пакетов информации в исследуемой системе поллинга при суммировании с нормированными задержками существенно снижают качество телефонных сообщений.

4. Разработанные алгоритмическое и программное обеспечения для расчёта ненормированных задержек пакетов информации при циклическом опросе приоритетных очередей в пакетных коммутаторах

узлов доступа рекомендовано использовать при мониторинге качества обслуживания пользователей «от говорящего до слушающего» и при проектировании мультисервисных узлов доступа.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включены результаты, полученные лично автором. Диссертантом разработаны алгоритмы и программное обеспечение для оценки задержек пакетов информации в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа. Программа для ЭВМ разработана при преобладающем участии диссертанта.

Теоретическая и практическая значимость работы. *Полученные теоретические результаты* вносят значительный вклад в проектирование узлов доступа мультисервисных сетей связи: предложена новая модель для оценки ненормированных задержек пакетов информации в системе поллинга, учитывающая специфику современных мультисервисных сетей связи, что позволяет точнее прогнозировать поведение сети и оптимизировать её работу; проведённые исследования углубляют понимание механизмов формирования очереди и распределения ресурсов в сетевых узлах, обеспечивая возможность точного анализа пропускной способности и уровня обслуживания пользователей; разработанные алгоритмы и программы рекомендуется использоваться в дальнейших исследованиях для моделирования и оптимизации сложных телекоммуникационных систем, способствуя развитию научного направления.

Практическая значимость работы заключается в том, что применение полученных результатов позволяет существенно повысить эффективность функционирования мультисервисных узлов доступа: использование разработанного метода позволяет минимизировать ненормированные задержки пакетов информации, уменьшить потери пакетов информации и обеспечить высокое качество обслуживания различных типов трафика (голосовая связь, видеоконференцсвязь, передача данных); разработанный метод легко интегрируется с современными программными инструментами для расчёта

ненормированных задержек пакетов, позволяя специалистам применять их непосредственно в своей профессиональной практике.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует пунктам паспорта научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» в части пунктов 5 и 6 указанной специальности: пункт 5 — «Исследование путей совершенствования управления информационными потоками», пункт 6 — «Развитие и разработка новых методов доступа абонентов к ресурсам сетей, систем и устройств телекоммуникаций».

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректностью используемого метода вычисления ненормируемых задержек пакетов информации в коммутаторах узлов доступа и подтверждена численными экспериментами. Результаты работы докладывались и обсуждались на Юбилейном тридцатом международном научно-техническом форуме «Телекоммуникационные и вычислительные системы» с докладом на тему: «Виртуальная мультимедийная подсистема VIMS» в 2022 г., на Международных отраслевых научно-технических конференциях «Технологии информационного общества» со следующими докладами: «Перспективные инфокоммуникационные технологии и сетевые услуги» в 2023 г.; «Функциональная модель сети доступа мультисервисной сети связи» в 2025 г.; «Метод оценки задержек пакетов информации в мультисервисных узлах доступа» в 2026 г.

Основные результаты диссертации изложены в 10 опубликованных работах, в их числе 2 работы в изданиях, включённых в список ВАК при Минобрнауки России, 2 работы в изданиях, входящих в международные базы цитирования WoS и SCOPUS, и 6 работ в изданиях, включённых в библиографическую базу научных публикаций РИНЦ.

Основное содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка терминов, списка литературы, включающего 116 наименований. Объём

диссертации составляет 125 печатных страниц (без учёта приложений), в том числе 33 рисунка и 15 таблиц.

1. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ СЕТЕЙ ДОСТУПА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕХ КОНЦЕПЦИЙ МСЭ-Т РАЗВИТИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

1.1. Анализ требований к параметрам сетей доступа в концепции МСЭ-Т «Сети следующего поколения – NGN»

Основные характеристики и базовые принципы архитектуры NGN.

Международный союз электросвязи - сектор стандартизации электросвязи (МСЭ-Т) рекомендовал представлять сеть электросвязи в виде четырёх фрагментов (рисунок 1.1).

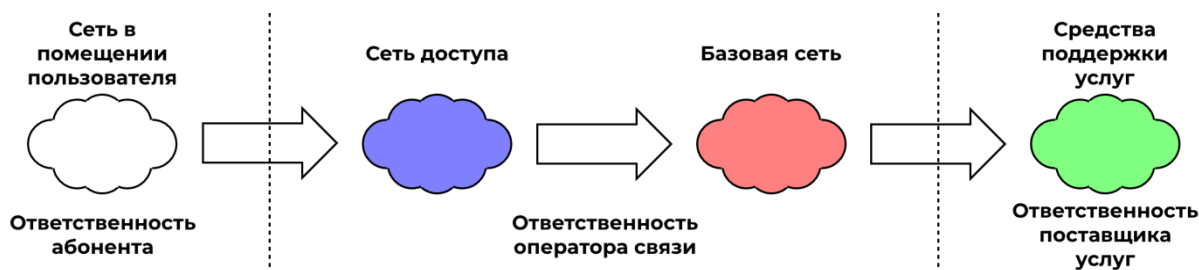


Рисунок 1.1 — Рекомендуемая МСЭ-Т модель сети электросвязи

В узле доступа скорость изменяется в зависимости от типа услуги. При получении мультимедийной услуги скорость может изменяться динамически в процессе обслуживания одного сообщения.

Основными мультимедийными широкополосными услугами являются: получение и передача данных, звука, видеоизображения. В соответствии с принципами построения сетей NGN, рассматриваемыми в рекомендации МСЭ-Т Y.2001 [1], сеть доступа (Access network) «обеспечивает свободный доступ пользователей к сетям и конкурирующим поставщикам услуг и/или выбираемым ими услугам. Она поддерживает универсальную подвижность, которая обеспечивает постоянное и повсеместное предоставление услуг пользователям».

Международный союз электросвязи в 2000 году принял концепцию перевода сетей с коммутацией каналов в сети с коммутацией пакетов – рекомендации серии Y.2000 «Сети следующего поколения» (NGN – Next

Generation Networks) [1, 2]. Ряд экспертов охарактеризовали эту концепцию как смену парадигмы развития сетей электросвязи. Архитектура NGN должна быть модульной, распределенной, открытой, иметь физическое и логическое разделение следующих уровней (рисунок 1.2):

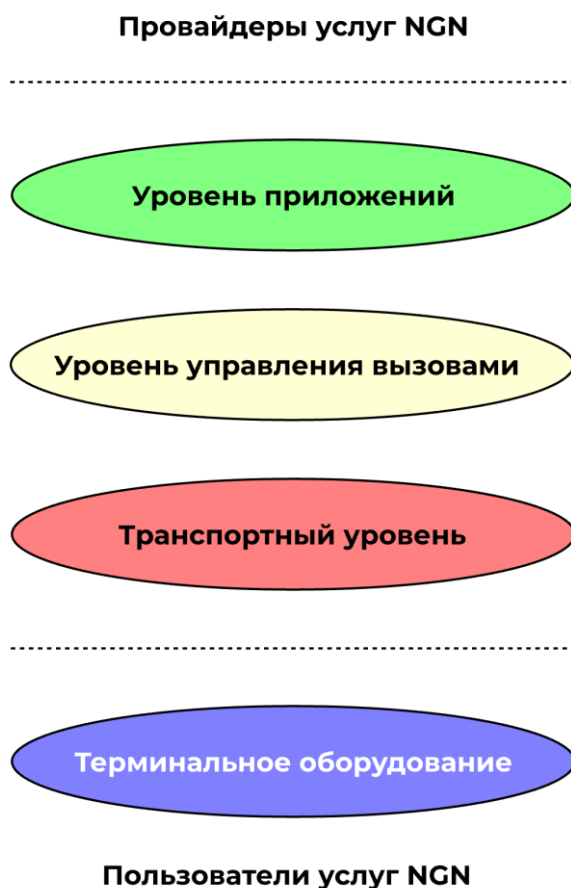


Рисунок 1.2 — Уровни архитектуры NGN

Терминальное оборудование МСЭ-Т в архитектуру NGN не включает. Сеть NGN состоит из трёх уровней:

- транспортного (на базе технологии IP/MPLS [3]);
- управления вызовами (сеансами) на базе подсистемы обслуживания мультимедийных сообщений IMS;
- управления услугами без вмешательства других уровней.

Все эти уровни охватывает уровень управления сетью (на рисунке 1.2 не показан).

Реализации концепции NGN под управлением мультимедийной платформы IMS.

Распределённая мультимедийная платформа IMS (IP Multimedia Subsystem) [4] обеспечивает конвергенцию мобильных и стационарных (фиксированных) сетей (рисунок 1.3).

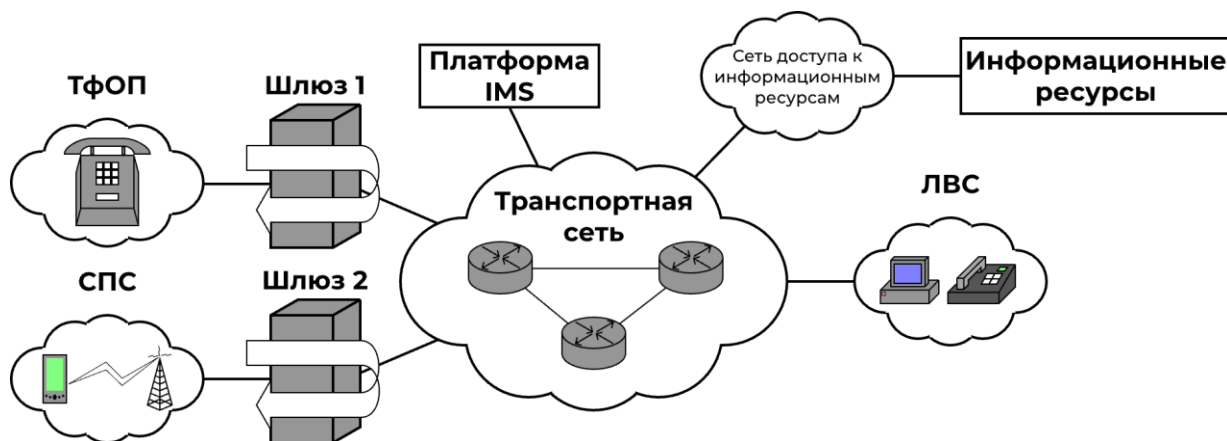


Рисунок 1.3 — Упрощённая схема мультисервисной сети под управлением IMS

Мультимедийная платформа IMS реализует следующие основные функции:

- управление установлением соединений с обработкой сигнализации;
- аутентификация и авторизация пользователей;
- управление маршрутизацией вызовов в пакетной сети;
- тарификация и сбор статистической информации;
- управление шлюзами с помощью протокола H.248/Megaco [5];
- взаимодействие с серверами приложений;
- взаимодействие с системой управления сетью.

Для управление сеансами связи подсистема IMS использует протокол сигнализации SIP (Session Initiation Protocol – протокол инициации сессий) [6] и базу абонентских данных HSS (Home Subscriber Server – сервер домашних абонентов) [7]. Она управляет сеансами связи при предоставлении следующих услуг: передачи голосовых сообщений; видеотелефонии; мультимедийных сообщений; организации IPTV; определения местонахождения абонента и его мобильности. Для каждого из сообщений обеспечивает требования по качеству

обслуживания QoS (Quality of Service) [8] и гибкую систему тарификации мультимедийных сеансов.

На рисунке 1.4 приведена упрощённая функциональная архитектура IMS.

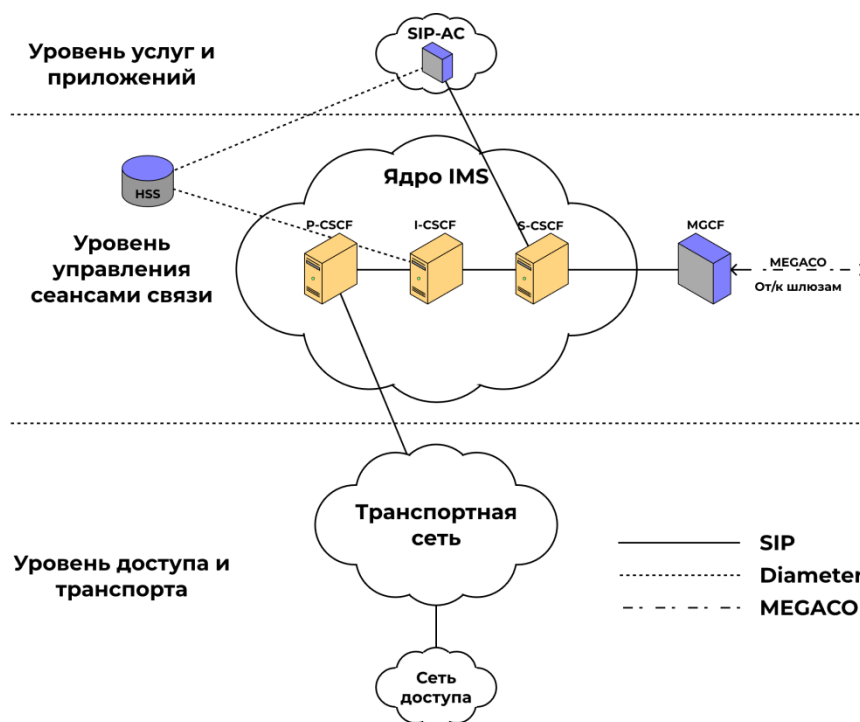


Рисунок 1.4 — Упрощённая функциональная архитектура IMS

Система IMS включает 20 основных функций, утверждённых рабочей группой 3GPP. Все функции IMS на русском языке приведены в [9]. Состав архитектуры IMS включает следующие уровни:

- уровень доступа обеспечивает подключение пользовательского оборудования различных пользователей к транспортной IP-сети;
- уровень транспорта базируется на оптоволоконных линиях связи и технологии Ethernet [11], поверх которой используется технология IP/MPLS;
- уровень управления сеансами связи является функциональным ядром мультимедийной платформы IMS;
- уровень услуг и приложений не входит в состав IMS, содержит серверы приложений (AS-Application Server) [24].

Международный форум Ethernet (Metro Ethernet Forum, MEF) в рекомендации MEF 23.2.2 в 2021 г. установил пять уровней качества функционирования технологии Ethernet (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 — Допустимые задержки передачи сообщений по технологии Ethernet

Уровни качества	Расстояние, км	Задержка, мс
PT1	до 250	до 2
PT2	до 1 200	до 8
PT3	до 7 000	до 44
PT4	до 27 500	до 172
PT5 спутниковый	до 72 000	до 277

Состав мультисервисного узла доступа.

На границе сетей с коммутацией каналов и с коммутацией пакетов для преобразования всех поступающих сообщений в пакетный вид устанавливаются медиашлюзы:

- 1) резидентный шлюз доступа RAGW (Resident Access Gateway) – для включения абонентских линий от традиционных оконечных устройств ТфОП, включая терминалы стандарта DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication);
- 2) шлюз доступа AGW (Access Gateway) – для включения ИКМ-трактов через интерфейс V5.2 в соответствии рекомендацией МСЭ-Т G.965;
- 3) транзитный (транкинговый) шлюз TG (Trunk Gateway) - для включения первичных потоков Е1 с сигнализацией ОКС №7 от цифровых АТС для сопряжения с сетью NGN.

Шлюзы управляются с помощью протокола H.248/Megaco.

Шлюзы и пакетные коммутаторы Ethernet реализуются в виде мультисервисного узла доступа MSAN (рисунок 1.5).

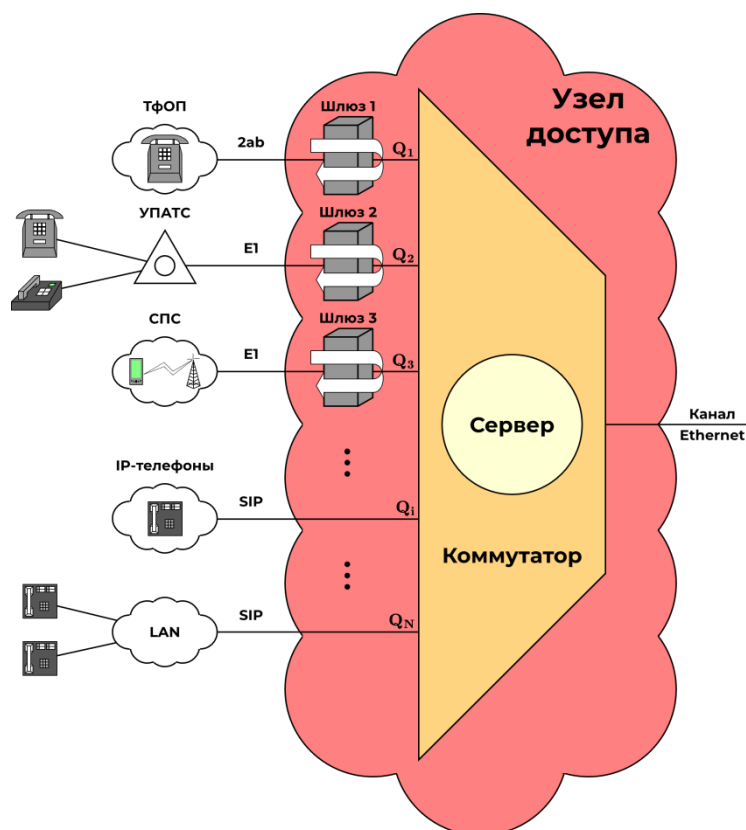


Рисунок 1.5 — Мультисервисный узел доступа (MSAN)

В шлюзах поступающие сигналы с помощью кодеков преобразуются в пакеты информации. Параметры наиболее часто используемых речевых кодеков приведены в таблице 1.2.

Коммутация пакетов осуществляется с помощью пакетных коммутаторов/маршрутизаторов, работающих на базе стека протоколов TCP/IP [25].

Перспективы сетей доступа связаны, в первую очередь, с прогрессом оптических сетей доступа [58]. Оптическая абонентская сеть представляет собой объект экономического и социального значения. Перспективной технологией являются пассивные оптические сети PON. МСЭ-Т разрабатывает рекомендации серии G, известные как XG-PON, например, G.987.3, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) разрабатывает стандарты, которые базируются на технологии Ethernet и известны как EPON, например, стандарт IEEE 802.3av.

Соединения между оптическими линейными терминалами OLT на станции и оптическими сетевыми терминалами ONT у пользователей реализуются с использованием архитектур типа «точка-точка» P2P или «точка - многоточие» P2MP.

Таблица 1.2 — Параметры речевых кодеков

Кодек	Тип кодека	Скорость кодирования, кбит/с	Задержка при кодировании, мс	Качество кодирования
G.711	ИКМ	64	0.75	4.2
G.726	АДИКМ	32	1	4.3
G.728	LD-CELP	16	3÷5	4.1
G.729	CS-ACELP	8	10	4.0
G.723.1	MP-MLQ	6.3	30	3.9
G.723.1	ACELP	5.3	30	3.7

Обозначения:

АДИКМ - адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция;

CELP - Code Excited Linear Prediction – кодирование на основе линейного предсказания и кодового возбуждения;

ACELP – Algebraic CELP - алгебраический CELP;

LD-CELP – Low Delay – CELP- низкая задержка CELP;

CS-ACELP – Conjugate Structure ACELP - сопряжённая структура ACELP;

MP-MLQ – Multy-Pulse- Multy Level Quantization - множественное импульсное многоуровневое квантование.

Архитектура P2P рекомендована МСЭ-Т в G.985 и G.986 для скоростей 100 Мбит/с и 1 Гбит/с соответственно. Недостатком архитектуры P2P являются большие эксплуатационные расходы.

При использовании архитектура P2MP от станции до сплиттера (электрического фильтра для частотного разделения каналов) прокладывается одна пара волокон длиной до 10–20км. Из пары оптических волокон используется только одно волокно. На станции используется только один комплект OLT для обслуживания нескольких пользователей. От сплиттера до жилища пользователя прокладывается пара волокон.

Обычно в PON используются три стандартизованные длины волны:

- в направлении от OLT к ONT на длине волны 1490 нм выполняется широковещательная передача всем приёмникам, причём отдельный приёмник принимает только предназначенный для него трафик;
- в направлении от ONT к OLT трафик передаётся на длине волны 1310 нм. Общее время связи делится между всеми пользователями. Канальные интервалы отдельным пользователям назначаются OLT на станции;
- третья длина волны 1550 нм предназначена для широковещательной передачи видео.

Для реализации комплексных услуг используются скорости от 100 Мбит/с до 10 Гбит/с. Параметры сетей доступа на этапе внедрения NGN приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 — Параметры сетей доступа на этапе внедрения NGN

Технологии	Среда передачи	Скорость	Расстояние
PON	Волокно	10 Мбит/с (данные) 2 Мбит/с (телефония)	до 20 км
Wi-Fi	Эфир	до 11.54 Мбит/с	50÷100 м
Спутниковая связь	Эфир	до 6 Мбит/с	Не ограничено
ИК-связь	Воздушные слои атмосферы	1÷1250 Мбит/с	500 м÷3 км
Ethernet	Волокно	10÷100 Мбит/с	до 150 км

Транспортные сети IP/MPLS.

В традиционных сетях IP маршрутизация пакетов осуществляется на основе анализа IP-адреса назначения (Destination IP Address). При большом числе последовательно включённых маршрутизаторов многократный анализ заголовка приводит к недопустимо большим задержкам при передаче сообщений реального времени.

Технология IP/MPLS (Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching – интернет-протокол / многопротокольная коммутация по меткам) предлагает

вместо маршрутизации коммутацию по метке входного порта маршрутизатора с выходным. Сокращается время доставки пакета информации.

Заголовок MPLS вставляется между заголовком кадра (второй уровень Эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС)) и заголовком пакета информации (третий уровень ЭМВОС). Элементы транспортной сети IP/MPLS показаны на рисунке 1.6.

Входной маршрутизатор по меткам на границе сети MPLS (LSR -Label Switching Router) управляет трафиком, генерирует MPLS-заголовки и назначает метки.

Все поступающие пакеты в LSR делятся на классы эквивалентности пересылки (Forwarding Equivalence Class - FEC) [26]. Каждому FEC присваивается метка, которая передаётся вместе с пакетом к следующему маршрутизатору.

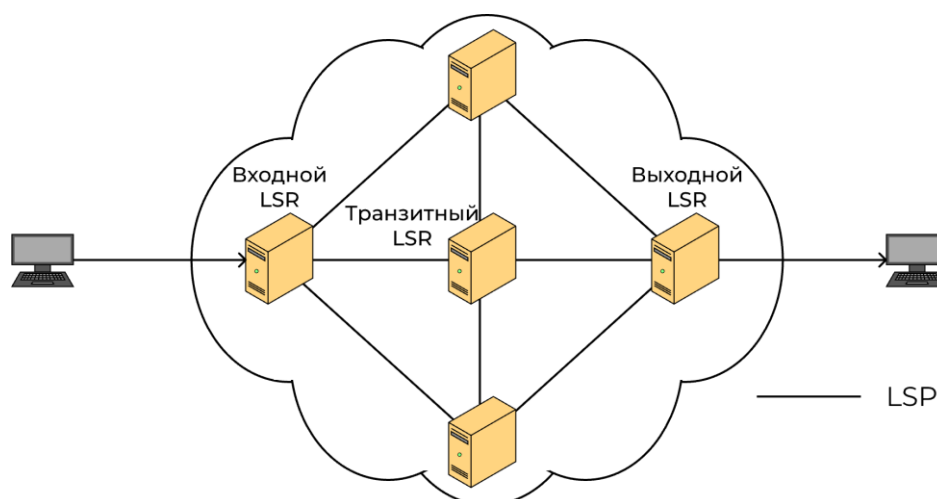


Рисунок 1.6 — Элементы сети IP/MPLS: LSP (Label Switched Path) – путь с коммутацией по меткам

Транзитный маршрутизатор по меткам находится в ядре сети MPLS и создаёт таблицу для пересылки пакетов. Действия маршрутизатора LSR зависят от значения метки, которую он принимает от предшествующего маршрутизатора.

Выходной маршрутизатор управляет трафиком, который выходит из сети MPLS и удаляет MPLS-заголовки.

Установление соединения. Входной маршрутизатор получает пакет с IP-адресом, обращается к своей таблице коммутации для определения класса

пересылки (FEC), определяет порт, в который необходимо переслать данный пакет, метку для пакета, добавляет метку и передаёт пакет.

Транзитный маршрутизатор по своей таблице коммутации определяет номер выходного порта с соответствующей меткой, коммутирует пакет и передаёт пакет далее по сети.

На завершающем этапе IP-пакет поступает на выходной маршрутизатор, который удаляет все метки и маршрутизирует его по каналу Ethernet.

Услуги NGN. Сетевые услуги в NGN делятся на низкоуровневые и высокоуровневые [2]. К *низкоуровневым* относятся услуги:

- виртуальных частных сетей VPN;
- сетей распределения контента CDN (Content Delivery Network) – предоставление контента как пакета услуг;
- сессий, не терминирующих трафик. Эти услуги создавались, чтобы оптимизировать вычислительную нагрузку по обработке трафика, например, обходить часто перегруженные участки сети;
- сетевых приложений особенно привлекательны для небольших корпораций, которые не могут позволить себе больших затрат на информационные технологии.

Высокоуровневые услуги представлены в виде следующих четырёх классов:

- голосовые услуги – фиксированная телефонная связь, мобильная связь, IP-телефония;
- видео услуги – каналы телевизионного вещания, различные услуги интерактивного видео (видео по требованию, предоплаченное видео и др.). Видео по требованию VoD — это технология доставки видео контента через Интернет;
- услуги Интернет – получение различной информации (текстовой, графической, видео), текстовый диалог (чат), платные сервисы, электронная коммерция и др.;

- интерактивные услуги мультимедиа – игры, дистанционное обучение, телемедицина и др.

Технология Q-in-Q позволяет создать несколько изолированных сегментов внутри одного VLAN за счёт добавления дополнительного тега к заголовку Ethernet-пакета. Она инкапсулирует две метки стандарта 802.1q в один кадр данных, что даёт возможность построить сети более крупного масштаба в соответствии с топологией Metro Ethernet.

В сетях с коммутацией пакетов требования к сетевым показателям качества обслуживания QoS (Quality of Service) приведены в рекомендации МСЭ-Т Y.1541 [27]. Требования собраны в наборы, которые называются классами качества обслуживания в сетях (таблица 1.4). Распределение нормированной задержки на основе эталонного тракта, состоящего из соединения сетей трёх сетевых поставщиков, приведён в рекомендации МСЭ-Т Y.1542 (07/2006) [99, 115].

Максимальный размер информационного поля пакета равен 1500 байт. В таблице 1.4 представлены границы сетевых показателей качества между интерфейсами пользователь-сеть (UNI - User Network Interface). Канал передачи данных организуется между UNI-UNI.

Таблица 1.4 — Классы сетевого QoS протокола IP и требования к рабочим характеристикам сети

Характеристика сети	Классы QoS					
	0	1	2	3	4	5
IPTD, мс	до 100	до 400	до 100	до 400	до 1 000	Н
IPDV, мс	до 50	до 50	Н	Н	Н	Н
IPLR	до $1 \cdot 10^{-3}$	до $1 \cdot 10^{-3}$	до $1 \cdot 10^{-3}$	до $1 \cdot 10^{-3}$	до $1 \cdot 10^{-3}$	Н
IPER	до $1 \cdot 10^{-4}$	до $1 \cdot 10^{-4}$	до $1 \cdot 10^{-4}$	до $1 \cdot 10^{-4}$	до $1 \cdot 10^{-4}$	Н

Условные классы 6 и 7 сетевого QoS для поддержки передачи цифрового телевидения приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 — Классы 6 и 7 сетевого QoS

Характеристика сети	Классы QoS	
	6	7
IPTD, мс	до 100	до 400
IPDV, мс	до 50	до 50
IPLR	до $1 \cdot 10^{-5}$	до $1 \cdot 10^{-5}$
IPER	до $1 \cdot 10^{-6}$	до $1 \cdot 10^{-6}$
IPRR	до $1 \cdot 10^{-6}$	до $1 \cdot 10^{-6}$

Влияние задержки пакетов информации на восприятие речи. Высокая задержка передачи пакета информации может привести к:

- медленному и прерывистому разговору;
- накладывающимся друг на друга шумам — например, когда один участник перебивает другого;
- эхо — если задержка в одно сторонней передаче превышает 35–40 мс, этот эффект становится заметным и раздражающим;
- нарушению непрерывности принимаемого образца речи — например, из-за кратковременного увеличения (скачка) задержки. Это воспринимается на слух как «заикание»;
- путанице — повторный или уточняющий вопрос одного из участников разговора совпадает с ответом другого участника;
- нарушение синхронизации между голосом и другими типами данных, особенно во время видеоконференций.

Проблемы информационной безопасности NGN. Инфраструктура сетей следующего поколения является гибкой и открытой для различного вида сервисов, но в то же время архитектура NGN за счёт своей открытости является более подверженной различного рода атакам, чем архитектура сетей с коммутацией каналов.

При создании систем информационной безопасности операторам связи необходимо следовать принципам, детально описанным в [49 - 52].

В соответствии с «правилом 10 лет» сети сотовой подвижной связи с 2011 г. начали реализовывать поколение 5G, а для фиксированных сетей связи МСЭ-Т рекомендовал новую концепцию «Будущие сети».

1.2. Анализ требований к параметрам сетей доступа в концепции МСЭ-Т FN (Future Networks) - «Будущие сети»

Основные цели и свойства Будущих сетей. В 2011 г. МСЭ-Т принял рекомендации серии Y.3000 по концепции Будущие сети FN (Future Networks) [14].

Утверждение концепции FN совпало по времени с появлением концепции Клауса Шваба «Четвёртой промышленной революции» [38-39]. Фундаментом Четвёртой промышленной революции является синтез и взаимодействие технологий трёх блоков: физического, цифрового, биологического.

Физический блок перспективных технологий включает: беспилотные транспортные средства; 3D-печать; робототехнику; новые материалы.

Инфокоммуникационный (цифровой) блок технологий: Интернет людей – вещей – всего – Будущий Интернет; «умный» дом», «умный» город; смартфоны, доступ в Интернет с помощью одежды и аксессуаров; хранение данных; «большие данные»; искусственный интеллект; цепочка блоков транзакций; облачные и туманные технологии (технологии виртуализации); технологии беспроводного доступа; квантовые технологии.

Биологический блок технологий: геномная инженерия; 3D-печать (биопечать); нейротехнологии.

Данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства и потребления во всех сферах социально-экономической деятельности общества.

Информационные и коммуникационные технологии являются катализатором при объединении различных технологий Четвёртой промышленной революции для достижения поставленных целей и получения при этом синергетического эффекта.

В рекомендации МСЭ-T Y.3001 определены основные свойства будущих сетей [40]: разнообразие услуг, виртуализация ресурсов, экономия энергопотребления, управляемость, мобильность, оптимизация, идентификация, надёжность и безопасность. В [14, 56, 96] сформулированы ключевые функции мультисервисных сетей доступа (рисунок 1.7).

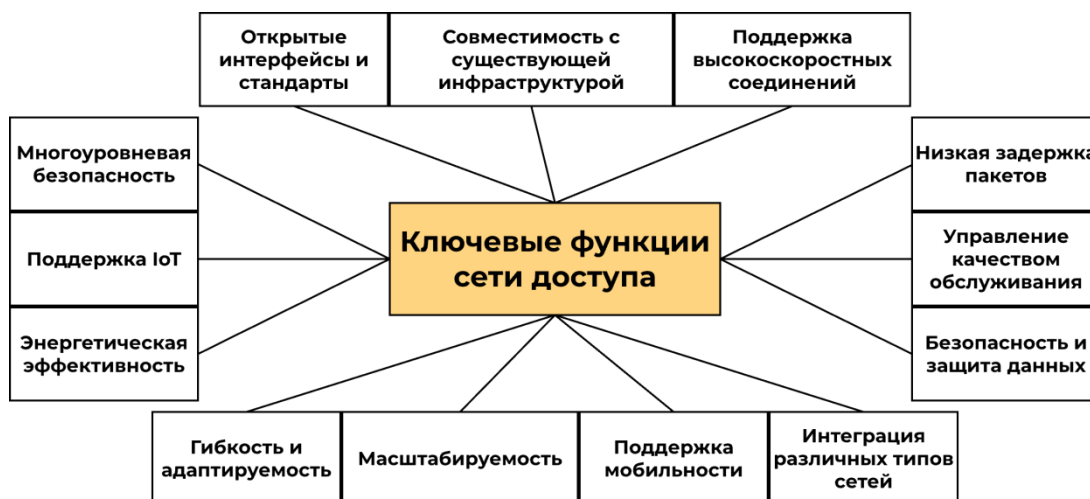


Рисунок 1.7 — Ключевые функции мультисервисных сетей доступа

Виртуализация сетевых ресурсов. В рекомендации Y.3011 [41] «виртуализация сети рассматривается как ключевая технология для реализации Будущих сетей». Физические ресурсы - транспортные, вычислительные и ресурсы хранения представляются в виде виртуальных ресурсов, которые объединяются для создания виртуальных сетей.

Создание в одной физической сети множества виртуальных сетей позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов и предоставить пользователям новые услуги без значительного увеличения существующих физических ресурсов. Виртуальные ресурсы реализуют все существующие механизмы и инструменты физических или логических ресурсов.

Виртуальный ресурс имеет несколько интерфейсов для доступа и управления виртуальным ресурсом. Ниже приведены основные характеристики виртуальных сетей.

- 1) Делимость. В одной физической сети может быть реализовано множество виртуальных сетей.

- 2) Абстрактность. Виртуальный ресурс не требует прямой связи с его физическим ресурсом.
- 3) Изолированность. Виртуальные ресурсы изолированы друг от друга так, что виртуальные сети не могут создавать взаимные помехи друг другу. Несанкционированный доступ к другим виртуальным сетям запрещён.
- 4) Гибкость и масштабируемость. Виртуальные ресурсы для построения виртуальных сетей гибко занимают, восстанавливаются и освобождаются по требованию в целях максимального размещения нескольких виртуальных сетей на физических ресурсах.
- 5) Программируемость. Виртуальные ресурсы для построения виртуальных сетей могут быть запрограммированы для разработки, развёртывания и экспериментирования с новыми протоколами связи для обеспечения эффективной обработки данных в виртуальной сети.
- 6) Аутентификация, авторизация и учёт для обеспечения надёжности и безопасности операций в виртуальной сети.

Виртуальная мультимедийная платформа IMS – vIMS.

При взаимодействии 3GPP и ETSI в рамках проекта TISPAN разработана виртуальная платформа virtual IMS. Решение vIMS обеспечивает работу приложений IMS в виртуализированной среде, которая является облачной платформой [42,43].

Все ключевые компоненты виртуализированы, кроме медиашлюза MGW (Media Gateway – медиашлюз), осуществляющий преобразование медиа трафика между телекоммуникационными сетями с коммутацией каналов и с коммутацией пакетов. Основными протоколами платформы vIMS являются SIP, H.248/Megaco, Diameter.

Архитектура виртуальной подсистемы IMS – vIMS приведена на рисунке 1.8.

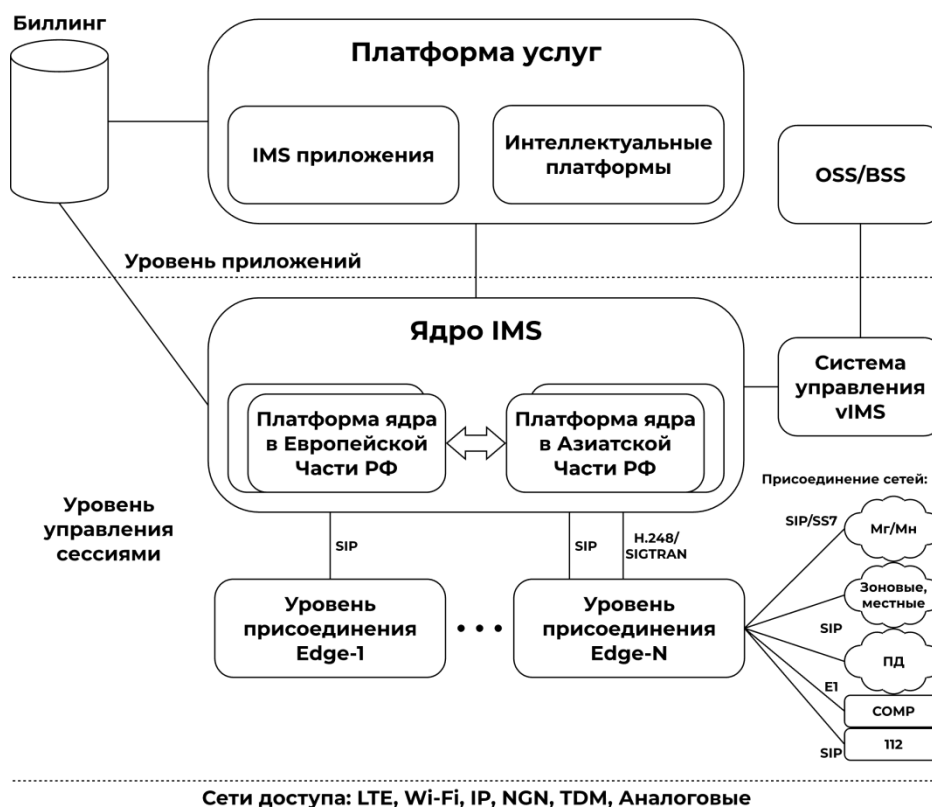


Рисунок 1.8 — Архитектура виртуальной подсистемы IMS – vIMS

Основными уровнями vIMS являются: уровень ядра (vIMS-Core) и уровень доступа (присоединения) (vIMS-Edge).

В нормальном режиме работы vIMS-ядро в каждом кластере работает в режиме разделения нагрузки и обрабатывает трафик только от заранее определённых уровней присоединения.

В случае потери ядра одного кластера вся нагрузка переключается на ядро второго кластера. Внутри каждого кластера дополнительно реализовано локальное резервирование ядра, обеспечивающее его высокую готовность.

В субъектах Российской Федерации устанавливаются подсистемы уровня присоединения – vIMS-Edge. Эти подсистемы обеспечивают подключение пользователей местных, зональных, междугородных и международных телефонных сетей, ПД, СОПМ, службы экстренного реагирования - 112.

Перспективные технологии концепции МСЭ-Т FN (Future Networks) – «Будущие сети» приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 — Перспективные технологии концепции МСЭ-T FN (Future Networks) – «Будущие сети»

Перспективные технологии	Предпосылки, принципы, свойства	Архитектура
Программно-конфигурируемые сети SDN	Разделение уровня передачи трафика и уровня управления; упрощение сетевых элементов уровня передачи данных; единый интерфейс между уровнем управления и уровнем передачи данных; логически централизованное управление сетью с помощью контроллеров; виртуализация физических ресурсов сети.	Архитектура из трёх уровней: сетевая инфраструктура; управление SDN; сетевые приложения.
Виртуализация сетевых функций NFV	Потребность снизить операционные затраты; вывод на рынок новых услуг; развитие серверных технологий; развитие технологий виртуализации и облачных вычислений; развитие технологий сетей SDN.	Облачные сети по принципу NFV, размеща в облаке основной функционал NFV.
Когнитивные системы и сети	Анализ своего функционирования; адаптация структуры и режимов работы согласно условиям и сетевым событиям; динамическое изменение своей топологии и/или эксплуатационных параметров в соответствии с требованиями пользователей или операторов связи; способность к определению логических и физических ресурсов на основе управления сетевыми элементами; использование технологии искусственного интеллекта (ИИ) для принятия решений в ответ на сложившуюся сетевую ситуацию.	Архитектура системы: на нижнем уровне – подсистема сбора информации от датчиков; на втором уровне – подсистема сбора информации с уровня 1; на третьем уровне – серверы, базы данных; на четвёртом уровне – математическое, логическое и программное обеспечения; на пятом уровне – функции прикладного ИИ.

Протоколы сигнализации: SIP - протокол установления сеанса; H.248/Megaco – протокол взаимодействия с медиап्लюзами; SS7 – общий канал сигнализации ОКС №7; E1- стандарт цифровой передачи данных общей пропускной способностью 2048 кбит/с.

Классификация трафика по полосе пропускания и по продолжительности услуг приведена в рекомендации МСЭ-T Y. 3042 [102] (Рисунок 1.9).

Одним из требований к Будущим сетям является их ориентированность на обработку больших объёмов данных. Идентификация данных возможна в дата-

ориентированной сетевой архитектуре DAN (Desk Area Network), описанной в рекомендации МСЭ-Т Y.3033.

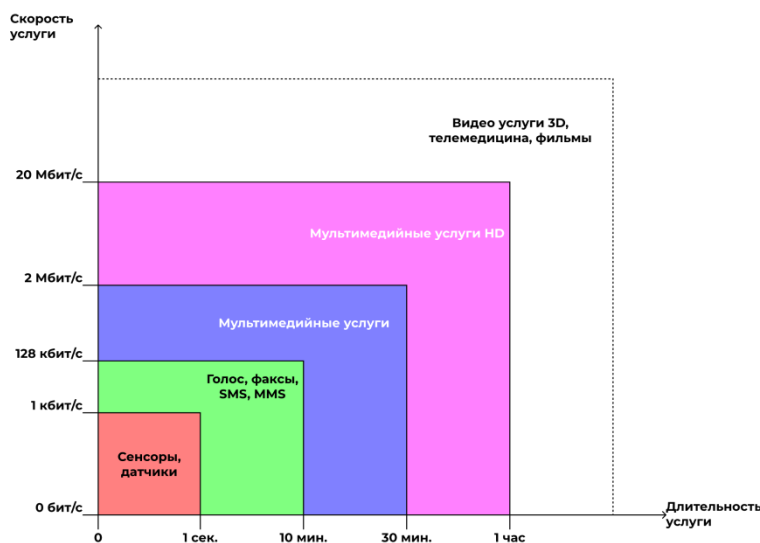


Рисунок 1.9 — Параметры услуг Будущих сетей по скорости и длительности

1.3. Анализ требований к параметрам сетей доступа в концепция МСЭ-Т «СЕТЬ 2030 – Network 2030»

Анализ недостатков фиксированных сетей. Международный союз электросвязи при анализе возможностей существующих сетей и требований к Будущим сетям отметил необходимость решения следующих проблем при построении Сетей 2030:

- в существующих фиксированных сетях связи отсутствует взаимодействие между услугами и сетью;
- существующие сети не могут передавать голографические и мультисенсорные сообщения;
- в существующих сетях не реализованы требования по передачи информации в строго определённое время;
- мультимедийные платформы доступа в будущих сетях должны содержать мощные вычислительные и коммуникативные ресурсы;

- в будущих сетях для обслуживания перспективных услуг необходимы повышенные требования к качеству обслуживания QoS;
- будущие сети будут представлять собой множество разнородных сетевых инфраструктур, для которых необходимо обеспечить бесшовное взаимодействие.

Результаты исследования МСЭ-Т «Сеть-2030». Для определения направлений решения перечисленных проблем МСЭ-Т создал фокус-группу FG NET-2030 для определения требований к перспективным фиксированным сетям, которые будут поддерживать новые виды коммуникаций:

- голографические коммуникации/телепорт;
- высококачественные коммуникации;
- высокоточные коммуникации.

В результате исследований созданы аналитические документы (отчёты) по Сетям 2030.

Архитектура Сети 2030. В документах фокус-группы определены архитектурные принципы построения Сети 2030 [56]:

- простота - предполагает минимальное число элементов сети при предоставлении услуг;
- встроенная программируемость - для быстрого развёртывания новых услуг;
- обратная совместимость с существующими сетями;
- гетерогенность (неоднородность) коммутационных, вычислительных ресурсов и ресурсов хранения данных;
- сетевые срезы (slice) - предоставление одновременно различных услуг в одной и той же сетевой инфраструктуре;
- однозначное наименование сетевых функций и услуг;
- внутренняя анонимность услуг и безопасность - должна использоваться система сквозной безопасности;
- устойчивость предоставления услуг с высоким качеством при нарушениях функционирования сети;

- сетевой детерминизм - гарантии детерминированного качества передачи.

Эти принципы предполагают реализацию перспективных технологий. Сеть 2030 будет содержать фиксированные, беспроводные и космические сети, облачные инфраструктуры. Архитектура сети будет иметь следующие характеристики:

- сеть будет включать виртуализированные (VNF) и неvirtуализированные (PNF) компоненты;
- сетевые функции будут реализованы с использованием как PNF, так и VNF;
- сеть должна обеспечивать соединения, реализуемые операторами различных сетей и поставщиками общедоступного и частного облаков;
- поддерживать услуги высоко качественные, высоко надёжные (с коэффициентом готовности выше 99,99999%) и высокоскоростные (до Тбит/с);
- для динамической конфигурации размещённых по территории услуг;
- поддерживать программируемость и мониторинг услуг;
- поддерживать динамическую масштабируемость сетевых ресурсов;
- поддерживать оплату по мере использования сетевых ресурсов.

Сети доступа. В перспективной Сети 2030 (NET-2030) целевая группа FG выделила следующие компоненты сети доступа/граничной сети (рисунок 1.10):

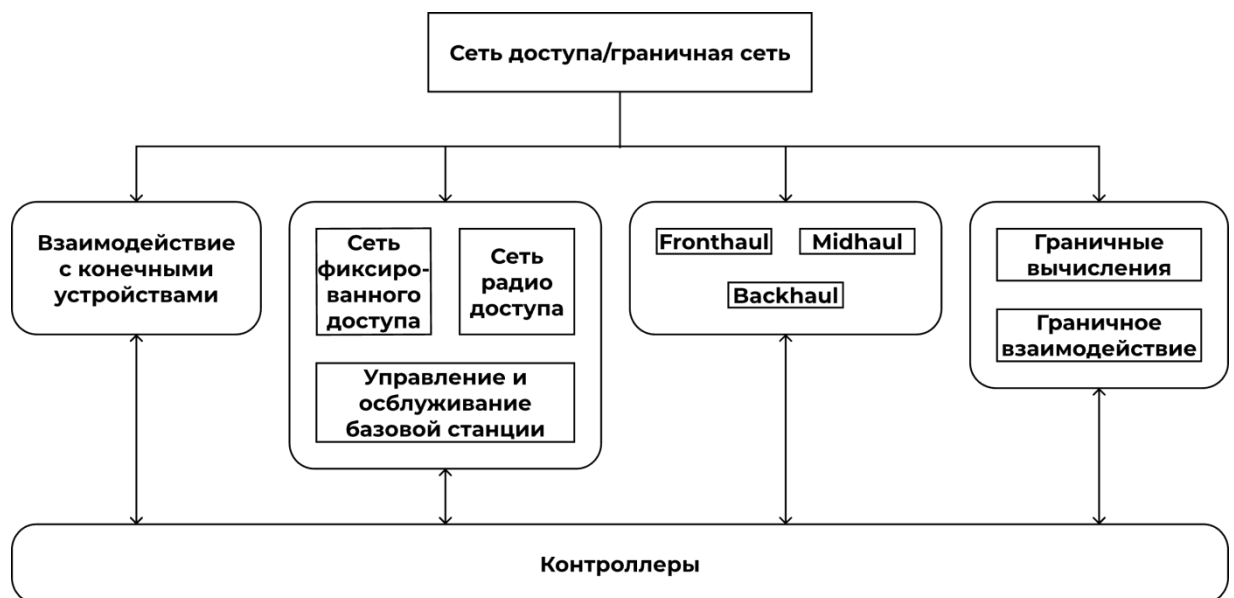


Рисунок 1.10 — Основные компоненты сети доступа/граничной сети

- взаимодействие с конечными устройствами (устройствами, используемыми человеком, устройствами машинного типа, датчиками, сенсорами);
- сеть фиксированного доступа, сеть радиодоступа, управление и обслуживание базовой станции;
- сегменты граничной сети: передний сегмент FH (Fronthaul) между радио блоком сети 5G и распределённым блоком вычислительной обработки;
- задний сегмент ВН (Backhaul) между граничной сетью и транспортной сетью (ядром магистральной сети). В середине между FH и ВН может располагаться средний сегмент граничной сети МН (Midhaul). Максимальная суммарная задержка в трёх сегментах граничной сети не должна превышать 10 мс. Для сервисов, высоко критичных к задержкам, не должна превышать 5 мс [4];
- граничные вычисления ЕС (Edge Computing) необходимы для поддержки различных сценариев использования сети, управления потоками данных, хранения обрабатываемых данных;
- граничное взаимодействие. При этом взаимодействии должны учитываться аспекты данных, интеграции, безопасности и требования, связанные с координированным взаимодействием;
- уровень контроллеров, например, SDN (Software-Defined Networking)-контроллер, RAN (Radio Access Network)-контроллер, контроллер сетевого среза - Slice Controller, контроллер качества услуг.

В соответствии с исследованиями FG NET-2030 ожидается, что за период с 2010 г. по 2030 г. скорость передачи пакетов в сетях доступа/граничных сетях увеличится со 100 Мбит/с до 100 Гбит/с, а задержки передачи пакетов снизятся со 100 мс до 5 мс (рисунок 1.11). В этих условиях разработка метода оценки ненормированных задержек пакетов информации в мультисервисных узлах доступа является актуальной.

Услуги Сети 2030. В соответствии с [56], «для реализации сетевых приложений в рамках концепции Сети 2030 могут быть задействованы два вида сетевых услуг – базовые и составные».

Базовая сетевая услуга требует специальной поддержки в транзитных узлах сети для определённого приложения. Составная сетевая услуга не является новой сетевой услугой и может состоять из одной или нескольких базовых услуг [87, 106].

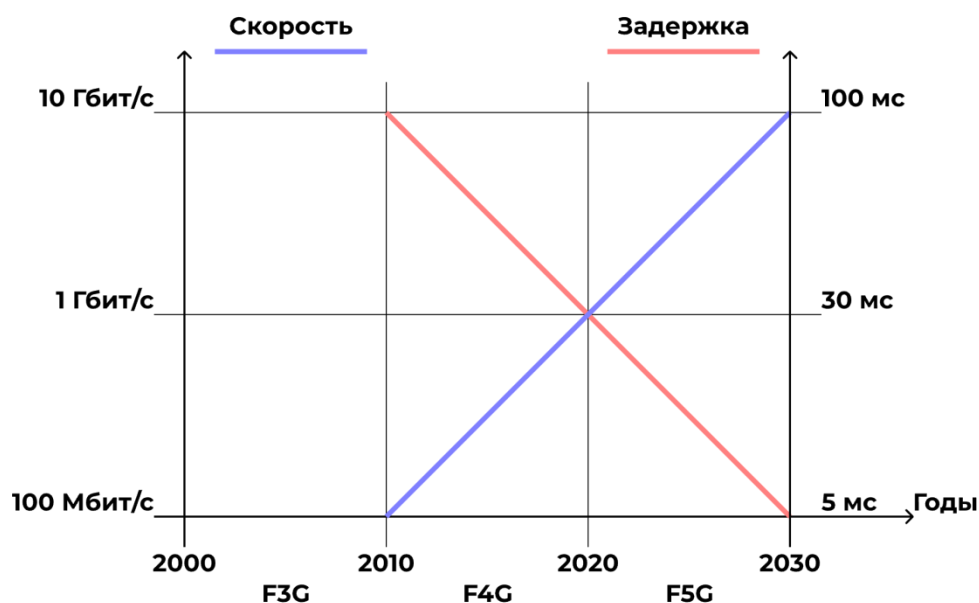


Рисунок 1.11 — Эволюция основных параметров сетей доступа/граничных сетей (F3G, F4G, F5G - обозначения поколений сетей фиксированной связи, рекомендованные ETSI)

Поддержка точности времени при доставке данных является фундаментальным свойством базовых услуг. Все базовые услуги Сети 2030 могут быть отнесены к одному из трёх типов услуг с инжинирингом времени (рисунок 1.12):

- 1) Услуги доставки не позже заданного момента времени (in-time) – пакеты могут быть доставлены в любое время, но не позже срока T_1 (рисунок 1.12а);

- 2) Услуги доставки в заданный интервал времени (on-time) – обеспечивают поступление данных в рамках определённого временного окна Δt (рисунок 1.12б);
- 3) Услуги скоординированной доставки обеспечивают гарантированную доставку пакетов нескольких взаимозависимых или связанных потоков данных (рисунок 1.12в).

Другой базовой услугой в Сети 2030 является услуга качественной доставки, которая позволяет различать части содержимого пакетов. При перегрузке отбрасывается не пакет целиком, а лишь менее значимые его части или части с более низким приоритетом.

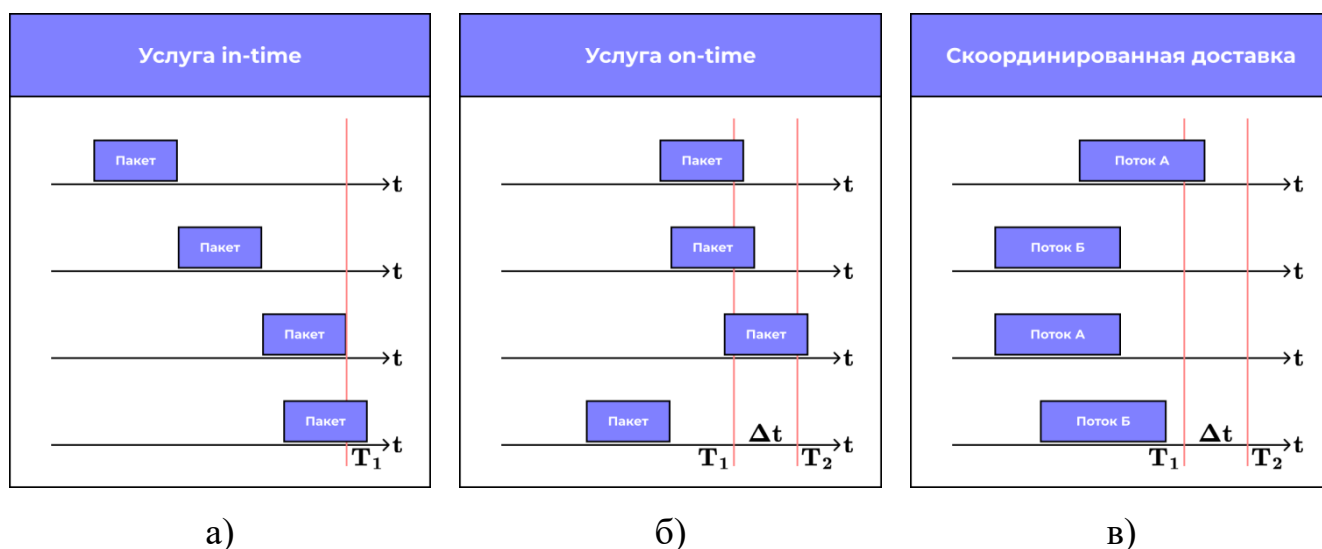


Рисунок 1.12 — Услуги с инжинирингом времени: а) in-time; б) on-time; в) скоординированной доставки

Приложения, требующие детализации как по времени доставки, так и по скорости передачи данных, являются составными услугами. Голографические и тактильные коммуникации являются примерами таких составных услуг.

Ещё одна составная услуга называется цифровой телепортацией, при которой полная трёхмерная цифровая проекция человека с задействованными несколькими чувствами имитирует удалённое присутствие. Временные рамки - примерно 30 мс.

В таблице 1.7 систематизированы требования к параметрам мультисервисных узлов доступа в соответствии с тремя концепциями развития мультисервисных сетей связи - NGN, FN и Net - 2030.

Таблица 1.7 — Обобщённые требования к параметрам узлов доступа

Концепции	Оборудование узлов доступа	Транспортные технологии	Пиковые скорости, Гбит/с	Допустимые задержки, мс
NGN	Шлюзы доступа. Среда передачи — медный кабель, оптоволокно, радиолиния. Протоколы управления: SIP, MGCP, H.248/MEGACO, SIGTRAN, RADIUS и др.	NGSDH, WDM, DWDM, Ethernet поверх NGSDH, IP/MPLS.	0.1	до 100
FN	Виртуализация сетевых ресурсов, абстрагирование интерфейсов, технология Carrier Ethernet.	Carrier Ethernet, интерфейсы: «пользователь-сеть», «межсетевой интерфейс».	10	до 30
Network 2030	Коммуникации: – голографические; – высококачественные; – высокоточные.	«Оптоволокно до всего и повсюду». Новые интерфейсы: «сеть-сеть»: «Оператор-Оператор».	100	до 5

Примечание: Понятие Carrier Ethernet возникло в 2001 году в международной организации Metro Ethernet Forum (MEF). Цель — развитие технологии Ethernet для применения в сетях общего пользования всех уровней: доступа, городских, глобальных.

Конвергенция сетей фиксированной и сотовой подвижной связи. Одним из важных требований к будущим сетям является поддержка высокой мобильности устройств, сервисов и пользователей. В мультимедийной платформе IMS с помощью протокола SIP поддерживается персональная мобильность пользователей.

Потребности пользователей в поддержке услуг с высокой мобильностью заставляют производителей оборудования и операторов согласовывать требования к сетям фиксированной и мобильной связи. МСЭ-Т согласует по времени смену концепций развития фиксированных сетей связи со сменой поколений мобильных сетей связи («правило 10 лет») (рисунки 1.13, 1.14) [55].

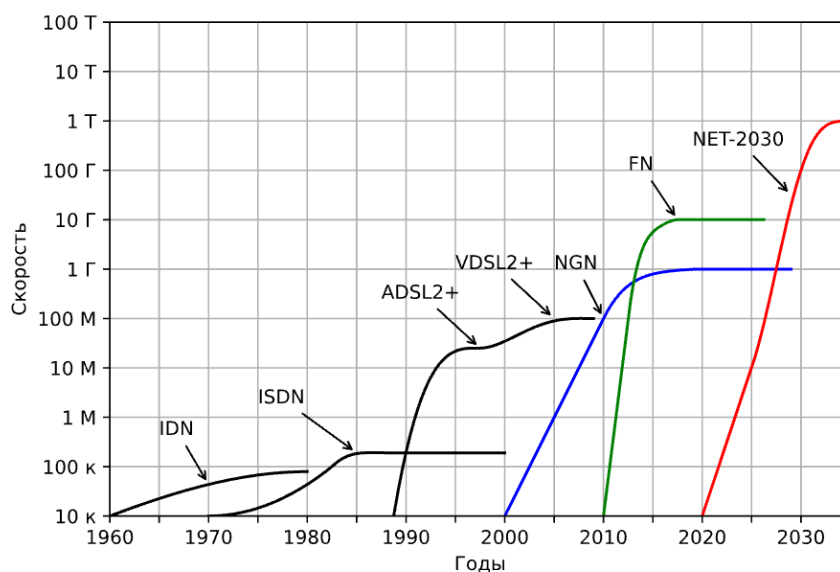


Рисунок 1.13 — Эволюция пиковых скоростей в фиксированных сетях связи

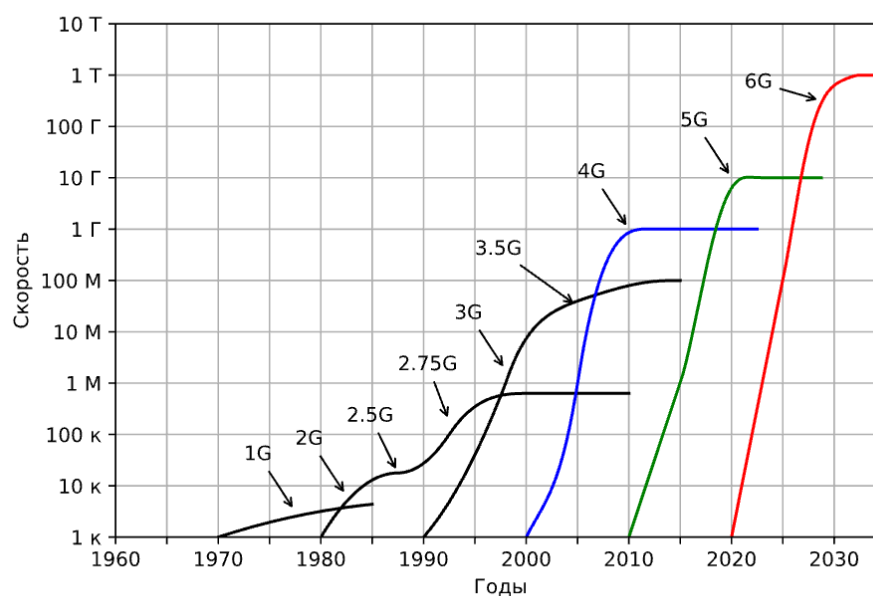


Рисунок 1.14 — Эволюция пиковых скоростей в сетях сотовой подвижной связи

При предоставлении услуг пиковые скорости в фиксированных сетях связи в соответствии с концепциями NGN, FN, Net-2030 согласованы с пиковыми скоростями услуг в сетях сотовой подвижной связи поколений 4G-6G.

Транспортные потоки в фиксированных сетях связи организуются по оптическим сетям связи с использованием технологии Ethernet [57, 58].

В корпоративных сетях связи мобильная связь пользователей предлагается с помощью технологии FMC (Fixed Mobile Convergence) [45], которая реализуется на стыке фиксированной и мобильной сетей.

Технология позволяет создать единую сеть офисных и мобильных оконечных устройств с общим планом короткой нумерации. Одним из ключевых преимуществ является то, что операторы мобильной связи предлагают вместе с FMC специальные внутрикорпоративные тарифы на мобильную связь. FMC можно рассматривать как пакет услуг centrex в мобильной сети.

Основные возможности технологии FMC:

- запись всех телефонных разговоров;
- все соединения внутри корпоративной сети бесплатны;
- возможность совершать исходящие соединения в сеть связи общего пользования;
- гибкая настройка алгоритмов маршрутизации соединений;
- единый счёт за соединения с фиксированных и мобильных устройств.

Ожидаемые МСЭ-Т новые элементы и технологии сети после 2030 г. приведены в таблице 1.8 [56].

Предложения Фокус-группы FG Net-2030 МСЭ-Т представлены в виде отчётов, на момент их публикации не были оформлены в виде рекомендаций.

Таблица 1.8 — Ожидаемые МСЭ-Т новые элементы и технологии сети после 2030 г.

Новые элементы сети	Содержание
Новые сетевые услуги VBE&HPC	Характеристики: – передача данных практически без потерь; – гарантия полосы пропускания; – гарантия задержек; – гарантия согласованной передачи данных от различных источников информации; – новый интерфейс UNI.
Новые медиа VLV&TIC	Перечень медиа: – расширенная дополненная/виртуальная реальность; – коммуникации голографического типа; – очень высокая полоса пропускания (> Тбит/с); – голографическая телепортация (задержки <5 мс); – цифровые сенсоры; – качественные коммуникации; – координированная передача потоков данных.
Новая сетевая гетерогенная архитектура (Many Networks)	Перечень сетей и технологий: – спутниковые сети; – масштабируемый Интернет; – частные сети; – граничные вычисления с множественным доступом MEC; – сети специального назначения; – сверхплотные сети; – новый интерфейс NNI; – новый интерфейс OOI.

Выводы по разделу 1

1. Начало нового тысячелетия в развитии телекоммуникаций ознаменовалось принятием МСЭ-Т концепции «Сети следующего поколения – NGN» по переводу сетей связи с технологии коммутации каналов на технологию коммутации пакетов. Эту концепцию некоторые учёные охарактеризовали как смену парадигмы развития телекоммуникаций.
2. Сети доступа NGN:
 - поддерживают широкий спектр услуг, включая мультимедийные услуги реального времени;
 - обеспечивают взаимодействие с сетями связи с коммутацией каналов;

- позволяют пользователю управлять услугами независимо от технологии доступа и типа используемого терминала.
3. При переходе к сетям с коммутации пакетов рекомендуется придерживаться принципов «неразрушающего» перехода к NGN и «обратной» совместимости - способность новой версии системы взаимодействовать с предыдущими версиями.
 4. В 2011 г. появились две следующие концепции:
 - концепция Будущих сетей (FN) в рекомендациях МСЭ-Т серии Y.3000, которая определяет эволюционный путь развития NGN;
 - концепция Четвёртой промышленной революции, в которой цифровые технологии обеспечивают взаимодействие всех других технологий.
 5. В концепции Будущих сетей (FN) рекомендуются к применению перспективные технологии: виртуализации, искусственного интеллекта, облачных вычислений, методов межмашинного взаимодействия (M2M) и другие прорывные технологии.
 6. При реализации концепции «Сеть 2030» ожидается появление новых, перспективных видов коммуникаций (голографических, высококачественных, высокоточных) и перспективных видов услуг (с инжинирингом времени, скоординированная доставка взаимозависимых или связанных потоков данных).

2. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ УЗЛА ДОСТУПА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ СВЯЗИ

2.1. Реализация функции кодирования информации в шлюзах узла доступа

Поступающая на входы узла доступа информация в виде голосовых сообщений, видео потоков, передачи данных с помощью кодеков преобразуется в пакеты информации. Кодирование информации — процесс преобразования сигнала из формы, удобной для непосредственного использования информации, в форму, удобную для передачи, хранения или автоматической обработки.

Кодирование голосовой информации — это процесс преобразования аналогового аудио сигнала (голоса) в цифровой формат для передачи по IP-сети. На принимающей стороне цифровые аудио данные декодируются обратно в аналоговый сигнал для воспроизведения через динамики или наушники.

При кодировании речи используются кодеки G.729, G.729.1, G.728, G.726, G.723.1, iLBC и Opus для VoIP и видеоконференций. AAC- Advanced Audio Coding —патентованный формат сжатия аудио, используется для хранения и передачи музыки и звука. AAC является преемником формата MP3 и предлагает более высокое качество звука при более низком битрейте, ГОСТ Р 54713–2011 [53]. В таблице 2.1 приведены параметры кодеков.

Кодирование видеоинформации — это процесс преобразования видеосигнала в эффективный формат данных для хранения или передачи.

Во время кодирования сокращается количество данных, необходимых для представления оригинального контента, что позволяет экономить пространство на диске и ускорять передачу информации.

Видеокодек — программа, которая сжимает видеоданные и восстанавливает сжатые данные. Ниже приведены популярные видеокодеки:

- H.264 (AVC) MPEG-4 Part 10 или AVC (Advanced Video Coding) — лицензируемый стандарт сжатия видео, позволяет сжимать видеофайлы без значительных потерь качества;
- H.265 (HEVC -; High Efficiency Video Coding — высокоэффективное кодирование видеоизображений. Используется для 4К- и 8К-видео, позволяет уменьшать размер файлов почти вдвое при сохранении детализации;

4К — примерно соответствующее 4 096 пикселям по горизонтали;

8К — приблизительно соответствующее 8 000 пикселей по горизонтали.

Сжатый сигнал формата 1080р 30 обычно требует для передачи около 4–8 Мбит/с, в то время как несжатый сигнал потребовал бы 1,5 Гбит/с – а это в 250 раз больше.

Кодирование интерактивного мультимедиа. Кодек MPEG-4 является стандартом из таких англ ISO/IEC, разработанным комитетом MPEG (Moving Picture Experts Group). Полностью совместимый расширенный вариант MPEG-4 версия 2 стал международным стандартом в начале 2000 г. MPEG-4 предназначен для решения трёх задач:- цифровое телевидение;- интерактивные графические приложения;- интерактивное мультимедиа WWW (World Wide Web, или Всемирная паутина)глобальная сеть взаимосвязанных веб-страниц, доступных через Интернет.

Кодеки для сжатия данных [97]:

- кодеки для сжатия текста: GZIP, Bzip2, LZW;
- кодеки для сжатия изображений: JPEG, PNG, GIF;
- кодеки для сжатия аудио: MP3, AAC, Vorbis;
- кодеки для сжатия видео: H.264/AVC, H.265/HEVC, VP8, VP9. Стандарт сжатия видео кодеками H.264 и H.265 обеспечивает запись видео потока по каналам IP на скорости 8 Мбит/с.

Клиентское оборудование (Customer Equipment - CE) для доступа к цифровым сервисам и ресурсам:

- персональные компьютеры и ноутбуки;
- мобильные устройства (смартфоны и планшеты);
- умные часы и фитнес-браслеты;
- устройства виртуальной и дополненной реальности;
- игровые консоли.

Клиентское оборудование подключается к сети доступа с помощью интерфейса UNI (User Network Interface).

Таблица 2.1 — Параметры кодеков

Кодирование голосовой информации			
№ п/п	Тип кодека	Рекомендация	Цифровой поток
1.	G.711	МСЭ-Т	64 кбит/с
2.	G.729	МСЭ-Т	8 кбит/с
3.	G.729.1	МСЭ-Т	8–32 кбит/с
4.	G.728	МСЭ-Т	16 кбит/с
5.	G.726	МСЭ-Т	16, 24, 32, и 40 кбит/с
6.	G.723.1	МСЭ-Т для IP-телефонии	6,3 и 5,3 кбит/с
7.	G.719	МСЭ-Т для речи и музыки	От 32 до 128 кбит/с
8.	iLBC (internet Low Bitrate Codec)	RFC 3951 передача голоса через Интернет	13.33 кбит/с при длине кадра в 30 мс или 15.20 кбит/с при длине кадра 20 мс
9.	Opus	Internet Engineering Task Force (IETF) RFC 6716	64 кбит/при длине кадра 20 мс, 80 кбит/10 мс и 128 кбит/5 мс
Кодирование видеоинформации			
10.	H.264 AVC (Advanced Video Coding) продвинутое кодирование видео	Стандарт сжатия видео МСЭ-Т и ISO/IEC	Скорость видеопотока: менее 1 Мбит/с - с малой задержкой; от 1 до 10 Мбит/с - большие задержки
11.	H.265 HEVC (High Efficiency Video Coding) высокоэффективное кодирование видео	Стандарт МСЭ-Т и ISO/IEC	Снижение скорости видеопотока на 35–40% по сравнению с H.264

Продолжение таблицы 2.1

Кодирование интерактивного мультимедиа			
12.	MPEG-4 версия 2 сжатия цифрового аудио и видео	Стандарт ISO/IEC 14496-22	Потоковое мультимедиа. Скорость до 4 Мбит/с.
13.	Российский патент RU2114518C1 - интерактивная мультимедийная информация	Патент Googl. Патентообладатель компания «Мультимедиа Систем Корпорэйшн»	Потоковое мультимедиа до 8 Мбит/с

2.2. Анализ принципов организации виртуальных локальных сетей в пакетных коммутаторах

Применение технологии Ethernet в сетях доступа. В соответствии с [25], набор стандартов IEEE 802.3, разработанный рабочей группой Института инженеров электротехники и электроники (IEEE), определяет физический уровень и управление доступом к среде передачи данных канального уровня (MAC) в проводном Ethernet [11].

Особенности сетей стандарта IEEE 802.3 Ethernet:

- технология применяется как в локальных сетях (LAN - Local Area Network), так и в глобальных вычислительных сетях (WAN - Wide Area Network);
- физические соединения могут осуществляться между сетевыми узлами с помощью медных или оптических кабелей;
- совместимость устройств разных производителей;
- поддерживает высокую масштабируемость скоростей - от 10 Мбит/с до 400 Гбит/с и выше;
- обеспечивает экономичность - широкое использование стандарта приводит к массовому производству и снижению затрат на сетевое оборудование и кабели;
- технология включает стандарты для Power over Ethernet (PoE), позволяющие устройствам получать питание через кабели Ethernet.

Классификация и маркирование кадров на входе. Для выделения отдельных замкнутых групп пользователей, которые должны обмениваться информацией только между собой, а также для возможности регулировать задержки при передаче сообщений различных услуг в технологии Ethernet предложена организация VLAN с помощью открытого стандарта IEEE 802.1Q. Технология VLAN (Virtual Local Area Network) — технология виртуальных локальных сетей позволяет разделить одну физическую сеть на несколько изолированных логических сегментов. Согласно стандарту IEEE 802.1Q в заголовке кадра Ethernet после поля «Адрес отправителя» и перед полем «Тип/длина» вставляется специальная метка (tag) длиной в 4 байта. При этом минимальная длина поля данных уменьшается с 46 байт до 42 байт. Формат этой метки приведён в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Формат метки по IEEE 802.1Q

Идентификатор протокола меток 0x8100, бит	Управляющая информация метки		
	Приоритет, бит	Индикатор допустимости удаления, бит	Идентификатор VLAN, бит
16	3	1	12

Идентификатор протокола меток длиной 16 бит указывает на тип протокола для маркировки кадров. Для IEEE 802.1Q используется значение 8100. Управляющая информация метки состоит из трёх частей: код приоритета 3 бита, которые определяют $2^3 = 8$ уровней приоритета. Деление потоков сообщений на классы приоритетов по обслуживанию приведено в таблице 2.3. В коммутаторах на каждом порту организуется несколько очередей. При этом кадры более высокого приоритета имеют минимальную задержку в обслуживании. Индикатор допустимости удаления 1 бит для удаления кадра при наличии перегрузки. Идентификатор VLAN в 12 бит указывает, какой VLAN принадлежит кадр.

Идентификатор VLAN может принимать $2^{12} = 4096$ значений. Значения 0 и 4096 зарезервированы, так что можно пронумеровать 4094 VLAN. Этого числа меток

достаточно для корпоративных сетей, но недостаточно для сетей общего пользования. Поэтому в 2005 году было принято дополнение IEEE 802.1ad к стандарту IEEE 802.1Q.

Таблица 2.3 — Классы и коды приоритетов по обслуживанию QoS

Класс	Код	Тип приоритета	Назначение приоритета
0	000	Routine	Самый низкий приоритет (рутина)
1	001	Best Effort Service	Негарантированная доставка
2	010	Immediate	Данные с высоким приоритетом (немедленный)
3	011	Flash	Важные приложения
4	100	Flash Override	Передача видео (переопределение вспышки)
5	101	Enterprise Cache Protocol	Передача голоса (корпоративный протокол кэширования)
6	110	Routing	Межсетевой контроль (маршрутизация)

С учётом дополнения для номера VLAN используют две метки - сервисную и клиентскую. При этом общее число VLAN составляет $4094 \times 4094 = 16\,760\,836$. В стандарте IEEE 802.1ad сервисная (внешняя) метка имеет идентификатор протокола меток 0x88a8-metro tag. SP-VLAN (Service Provider VLAN) — уникальный идентификатор VLAN, который используют провайдеры при оказании услуг пользователям, в сетях которых настроено несколько VLAN [107]. Каналы Ethernet подключаются в выходы пакетных коммутаторов с помощью интерфейса NNI (network-to-network interface) — межсетевой интерфейс, обеспечивает физическое или виртуальное соединение между сетями [115].

Состав форматов кадров при реализации стандартов IEEE 802.3, IEEE 802.1Q, IEEE 802.1ad приведён на рисунке 2.1.

Клиентская (внутренняя) метка CE-VLAN (Customer Edge - клиентское устройство) сохраняет идентификатор протокола меток 0x8100. Интерфейс в сетях Ethernet UNI (User-to-Network Interface) соединяет оборудование пользователя (например, коммутаторы или маршрутизаторы) с инфраструктурой сети провайдера. Это точка соединения, где оборудование пользователя подключается к ядру сети, тегирование трафика — это процесс добавления специального тега к данным, чтобы указать, к какой виртуальной локальной сети VLAN они принадлежат. Коммутатор

использует эту метку, чтобы направлять данные только к тем устройствам, которые находятся в той же VLAN.

Организация VLAN — это логическое деление пакетного коммутатора на выходе сети доступа на не сообщающиеся между собой сети. Идентификатор VLAN (VID) имеет; 12 бит, диапазон возможных значений VLAN - от 1 до 4095.

Стандарт IEEE 802.3 Ethernet	Не маркированный формат кадра					
	Преамбула	Адрес получателя	Адрес источника	Тип/длина	Данные	Контрольная сумма
	7 байт	6 байт	6 байт	2 байта	46-1500 байт	4 байта

Стандарт IEEE 802.1Q	Маркированный формат кадра						
	Преамбула	Адрес получателя	Адрес источника	Тег клиентский	Тип/длина	Данные	Контрольная сумма
	7 байт	6 байт	6 байт	4 байта	2 байта	42-1500 байт	4 байта

Стандарт IEEE 802.1ad	Дважды маркированный формат кадра							
	Преамбула	Адрес получателя	Адрес источника	Тег сервисный	Тег клиентский	Тип/длина	Данные	Контрольная сумма
	7 байт	6 байт	6 байт	4 байта	4 байта	2 байта	38-1500 байт	4 байта

Рисунок 2.1 — Состав форматов кадров при реализации стандартов IEEE 802.3, IEEE 802.1Q, IEEE 802.1ad

Для идентификации принадлежности трафика к определённой виртуальной локальной сети VLAN производится тегирование трафика - добавления в заголовок кадра специальной метки (тега). Тег определяет восемь уровней приоритета потоков сообщений.

На канальном уровне L2в технологии Ethernet класс услуг CoS (Class of Service) — это 3-битное поле для маркировки кадров в соответствии со стандартом IEEE 802.1p. Оно расположено в 4-байтовом заголовке IEEE 802.1Q.

Для маркировки пакетов на сетевом уровне L3используетсяполе DSCP (Differentiated Services Code Point - кодовая точка дифференцированных услуг), позволяющее классифицировать сетевой трафик в IP-сетях (деление потоков сообщений на классы приоритетов по обслуживанию).

Разметкой кадра является определение метки QoS. Для кадров, поступающих в плату сети доступа без тега VLAN, выполняется начальное маркирование с добавлением в них тега VLAN.

Коммутация пакетов осуществляется с помощью пакетных коммутаторов/маршрутизаторов, работающих на базе стека протоколов TCP/IP. Основными мультимедийными широкополосными услугами являются: получение и передача данных, звука, видеоизображения. Сеть доступа должна обеспечить комплексное их предоставление через единую инфраструктуру.

2.3. Анализ способов размещения пакетов в очередях коммутатора

Механизм предотвращения перегрузки очередей. На входе в устройство кадр проходит процедуру классификации. Для этого устройство разбирает последовательность бит, находящуюся в теге VLAN, и в соответствии с ней избирает дальнейший сценарий действий.

Эта последовательность может указывать на правила обслуживания QoS, действия, которые обработчик должен проделать перед его отправкой на выход, например, измерить скорость кадра, при необходимости назначить кадру новую метку QoS, далее кадр проходит механизмы балансировки интенсивностей нагрузки (если требуется) и поступает в очередь на обработку планировщика.

Механизм предотвращения перегрузки вступает в действие непосредственно перед назначением кадров выходным очередям по приоритету. Цель реализации этого механизма состоит в предотвращении заполнения очередей кадрами с последующим неконтролируемым "отбрасыванием хвоста" кадров.

Используется алгоритм WRED (Weighted Random Early Detection) для улучшения производительности сети. WRED является алгоритмом предотвращения перегрузки, поскольку обеспечивает возможность заблаговременного выборочного отбрасывания определённых пакетов до заполнения очередей [21].

Для назначения приоритетов потокам трафика большое значение имеет правильная стратегия дебуферизации выходных очередей. Потоки, для которых необходимо обеспечить малое время задержки и постоянную пропускную способность, должны обслуживаться первыми и, соответственно, первыми передаваться через интерфейс. Для каждой очереди предусмотрен максимальный допустимый размер в диапазоне от 0 до 256 кадров.

Существуют различные методы обслуживания приоритетных очередей:

- строгий приоритет очереди SP (Strict Priority queuing – пакеты распределяются по очередям в соответствии с классом обслуживания);
- взвешенный циклический перебор WRR (Weighted Round Robin). Для этого алгоритма предусмотрен параметр "кредит", связанный с каждой очередью и определяющий количество пакетов, подлежащих отправке из очереди в рамках каждого цикла. При отправке пакета происходит уменьшение значения кредита. Максимальное значение кредита равно весу очереди.
- наиболее продуктивным является алгоритм LLQ (Low Latency Queuing – организация очередей с низкой задержкой), который представляет собой смесь SP и WRR. Передаваемый в реальном времени трафик (такой как VoIP), помещается в очереди со строгим приоритетом, а остальной трафик – в очереди WRR. В общем случае должна быть одна приоритетная очередь с голосовым трафиком.

Диспетчеризация выходных очередей по приоритету вместе с классификацией на входе представляет собой основной механизм QoS.

Основные функции блока организации очередей. Базовым компонентом блока являются выходные очереди по приоритету. Перед передачей кадры помещаются в очередь, где они ожидают своей очереди на передачу.

Если интенсивность входящего потока кадров превышает интенсивность исходящего потока кадров, происходит перегрузка очереди. В этом случае цель реализации очередей состоит в разделении кадров на «более важные» и «менее важные». Каждая очередь представляет собой один поток.

Таким образом, обеспечивается возможность назначения более важным кадрам более высокого приоритета, чем менее важным. Данный блок обеспечивает реализацию следующих функций:

- установление соответствий для очередей - определение очереди, в которую следует поместить кадр в соответствии с меткой QoS;
- предотвращение перегрузки - сравнение кадра с данными измерителей по коэффициенту использования очереди. Если при реализации алгоритма предотвращения перегрузки выявляется повышенный коэффициент использования очереди для данного кадра (в соответствии с меткой QoS), выполняется отбрасывание кадра. В противном случае кадр помещается в очередь.

Для измерения скорости определённого потока поступающие пакеты сравниваются с данными измерителей скорости. К базовым действиям относятся:

- отбрасывание кадра;
- изменение его метки типа сервиса QoS;
- маркирование кадра (изменение в нём поля CoS или DSCP).

Маркирование кадра также может выполняться и на выходе блока организации очередей перед помещением его в соответствующую выходную очередь.

Конечным результатом для данного блока является постановка пакета в одну из очередей или отбрасывание пакета. Другие действия на данном этапе не выполняются.

Классификация кадров и пакетов с доверием. Режим доверия — это специальный режим, который блокирует любые сторонние программы. Цель режима доверия — создать барьер, который нельзя случайно преодолеть и иметь возможность легко идентифицировать любое приложение, которое смогло это сделать.

При использовании команды «*trust*» (доверие) для установки режима с доверием на отдельном интерфейсе пользователю доступны следующие опции:

- без доверия: ни одно из полей, передаваемых по данному интерфейсу, не считается на плате доверенным;
- доверенное значение CoS: значение CoS (приоритет 802.1p) во входящих кадрах, передаваемых по данному интерфейсу, рассматривается на плате как доверенное (включается с помощью команды «mls qos trust cos»);
- доверенное значение DSCP: значение DSCP во входящих пакетах информации, передаваемых по данному интерфейсу, рассматривается на плате как доверенное.

В случае установки режима с доверенным значением CoS (Class of Service). (CoS — информация о классификации Ethernet - кадров на уровне L2, поле занимает 3 бита и может принимать значения от 0 до 7) выполняются следующие процедуры:

- назначение битов IntPri (внутренний приоритет) метки QoS в соответствии с таблицей соответствий между значениями CoS и идентификаторами выходных очередей с использованием приоритета кадра;
- назначение приоритета интерфейса для CoS при получении немаркированного кадра. Приоритет интерфейса используется для назначения битов IntPri метки QoS в соответствии с таблицей соответствий между значениями CoS и идентификаторами выходных очередей;
- копирование CoS из тега C-TAG в тег S-TAG при использовании продукта в качестве граничного моста поставщика услуг. Значение приоритета из тега C-TAG используется для назначения битов IntPri метки QoS в соответствии с таблицей соответствий между значениями CoS и идентификаторами выходных очередей;
- назначение приоритета интерфейса для CoS в теге S-TAG при использовании продукта в качестве граничного моста поставщика услуг и при получении немаркированного кадра. Приоритет интерфейса используется для назначения битов IntPri метки QoS в соответствии с

таблицей соответствий между значениями CoS и идентификаторами выходных очередей;

В случае установки режима с доверенным значением DSCP выполняются следующие процедуры: - назначение битов IntPri метки QoS в соответствии с таблицей соответствий между полем DSCP и идентификаторами выходных очередей;

- копирование битов приоритета отбрасывания поля DSCP в биты IntDP метки QoS. При получении DSCP EF в биты IntDP не записывается какая-либо информация о приоритете отбрасывания (00), поскольку для кадров EF требуется привилегированное обслуживание и для них не должен применяться приоритет отбрасывания. Поэтому для продукта предусмотрена полная поддержка групп поведения на отдельных транзитных участках AF, EF и CS (AF обеспечивает гарантированную доставку, EF — экстренную пересылку, CS — совместимость с определёнными параметрами трафика);
- обработка пакетов, не являющихся IP-пакетами, аналогично режиму без доверия.

По умолчанию на всех интерфейсах конфигурируется режим с доверенным значением CoS. Блок-схема алгоритма классификации в режиме с доверием приведена на рисунке 2.2.

Высокоуровневая классификация трафика. За классификацией в режиме с доверием следует высокоуровневая классификация с использованием классов трафика. С помощью команды *class-map* пользователь может создавать классы трафика для отделения определённого потока кадров от других кадров.

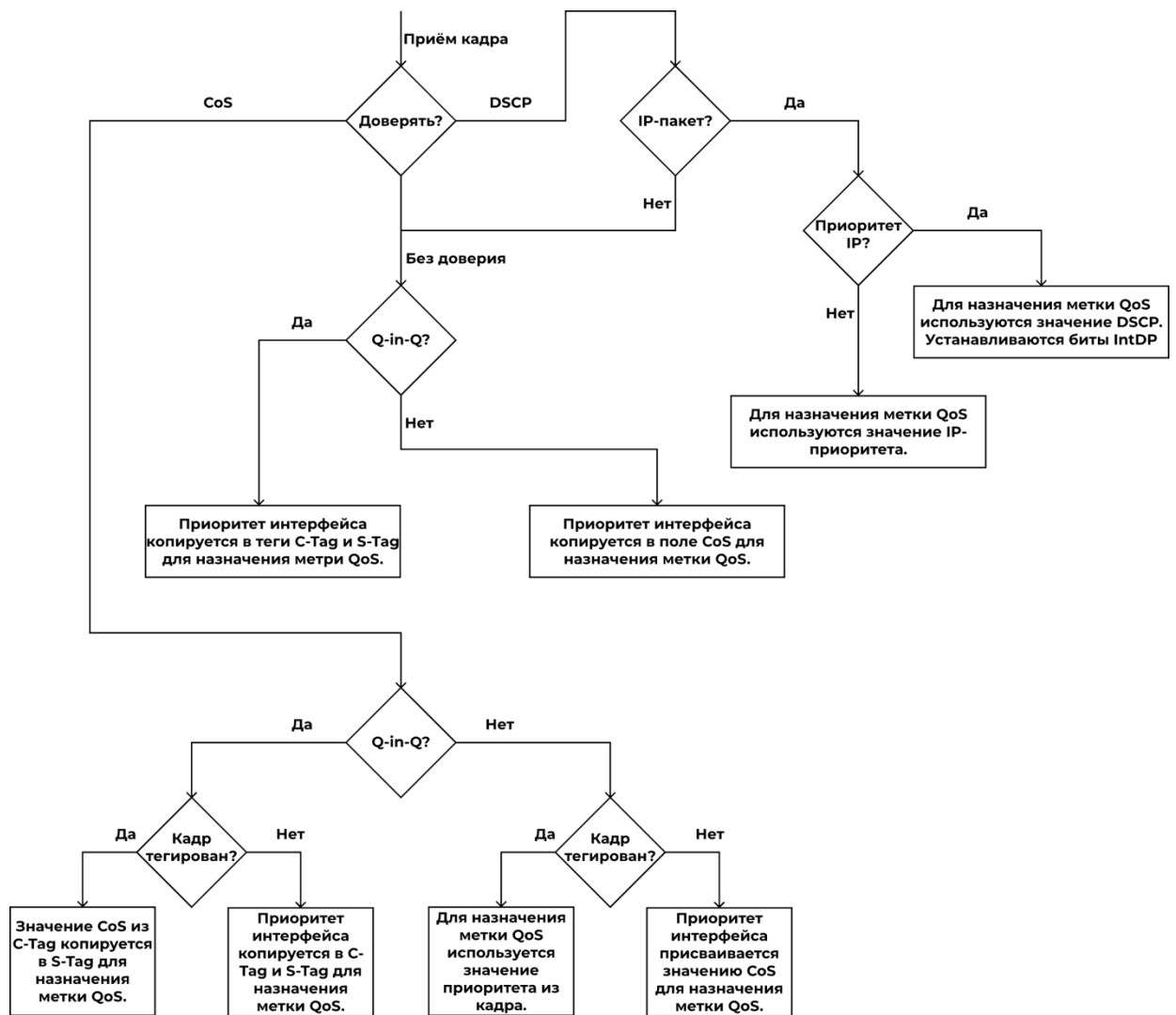


Рисунок 2.2 —Блок-схема алгоритма классификации в режиме с доверием

Команда *class-map* используется для задания класса трафика и критериев этого класса, на основе которых сетевой трафик будет группироваться в классы (классифицироваться).

Основная идея классификации трафика состоит в разделении всего трафика на потоки, каждый из которых должен обрабатываться определенным образом для обеспечения QoS. В этом заключается принцип дифференцированного обслуживания или DiffServ, при котором обеспечивается отделение каждой услуги (класса трафика) от остальных услуг [21, 25].

Например, для речевого трафика требуется низкая пропускная способность, очень малое время задержки и низкий коэффициент потери пакетов.

Для видеотрафика требуется очень высокая пропускная способность, среднее время задержки и очень низкий коэффициент потери пакетов.

Обработка трафика данных обычно выполняется по принципу обслуживания с максимально возможными усилиями, т. е. для него не предусматриваются какие-либо гарантии по пропускной способности, времени задержки или коэффициенту потери пакетов, но для него может использоваться значительная часть полосы пропускания в случае её доступности.

При использовании классов трафика появляется возможность разделения этих типов трафика и назначения им различных режимов обеспечения QoS с использованием политик трафика.

Технология Q-in-Q позволяет создать несколько изолированных сегментов внутри одного VLAN за счёт добавления дополнительного тега к заголовку Ethernet-пакета. S-Tag (Service Tag) и C-Tag (Customer Tag) — это теги в кадре Ethernet, которые используются в технологии Q-in-Q (Q-туннелирование), описанной в стандарте ETSI IEEE 802.1ad.

S-Tag — тег сети провайдера, состоит из четырёх байт. Коммутация в домене сети провайдера основывается на значении поля S-Tag и MAC-адреса получателя кадра Ethernet.

C-Tag — тег сети пользователя, используется для создания VLAN-доменов сетей пользователей.

В кадрах с несколькими тегами сначала идёт C-Tag, а все остальные теги — S-Tags.

Для продукта предусмотрена поддержка классификации на основе комбинации следующих полей протоколов в заголовках L2, L3 и L4:

L2 (Ethernet) канальный уровень:

- MAC-адрес источника кадра Ethernet;
- MAC-адрес пункта назначения кадра Ethernet;
- VLAN: идентификатор VLAN (при применении двойного тегирования VLAN используется S-TAG);

- вторичная VLAN: идентификатор VLAN в теге C-TAG при применении двойного тегирования VLAN для кадра;
- EtherType: значение поля EtherType, определяющее протокол вышестоящего уровня;
- CoS: значение поля приоритета 802.1p (анализ приоритета) в теге VLAN (при применении двойного тегирования VLAN используется S-TAG). CoS — способ управления трафиком, который позволяет группировать трафик одного типа вместе и затем обрабатывать его по-разному, в зависимости от приоритета;
- вторичный CoS: значение приоритета в теге C-TAG при применении двойного тегирования VLAN для кадра.

L3 (IP) сетевой уровень:

- IP-адреса источника и пункта назначения в IPv4 или в IPv6;
- DSCP: значение точки кода дифференцированных услуг (крайние левые 6 битов поля ToS -Type of Service);
- ToS: значение поля типа обслуживания;
- IP-приоритет: значение CSC -Class Selector (крайние левые 3 бита поля ToS);
- класс трафика: поле класса трафика IPv6;
- метка потока: поле метки потока IPv6;
- IP-протокол: номер IP-протокола, определяющий протокол вышестоящего уровня;
- следующий заголовок: поле следующего заголовка IPv6;

L4 транспортный уровень:

- порт источника L4: номера порта TCP или UDP источника.

Политики трафика на входе и на выходе. Политика трафика представляет собой набор классов трафика с заданными действиями, выполняемыми для каждого из этих классов трафика. После определения классов трафика пользователь создаёт политику трафика с помощью команды *policy-map*. Впоследствии он может назначить политику интерфейсу. Действия, определённые

в политике трафика для данного класса трафика, выполняются для кадров, принадлежащих к этому классу.

Предусмотрено два типа политик:

Политика на входе – политика, применяющаяся на входящем направлении. Классификация кадров, поступающих на интерфейс, выполняется в соответствии с политикой на входе данного интерфейса.

Политика на выходе – политика, применяющаяся на исходящем направлении. Классификация кадров, передаваемых с интерфейса, выполняется в соответствии с политикой на выходе данного интерфейса.

Для пользователя предусмотрена возможность конфигурирования действий для классов, выполняемых в рамках политик. Для продукта предусмотрена поддержка конфигурирования следующих действий в рамках политик трафика:

- отбрасывание: явное отбрасывание кадра. Поддерживается для политики на входе и на выходе;
- назначение очереди: передача кадра в определённую выходную очередь по приоритету. Это означает установку выбранного номера очереди в битах IntPri (приоритет прерывания) метки QoS. Поддерживается для политики на входе и на выходе.

Перенаправление на интерфейс: перенаправление кадра на определённый интерфейс. Поддерживается только для политики на входе.

Маркирование CoS: назначение кадру определённого значения CoS. Это действие также обеспечивает маркирование C-TAG (в случае кадров с двойным тегированием). Изменение битов IntPri метки QoS выполняется в соответствии с таблицей соответствий между значениями CoS/CSC и идентификаторами выходных очередей. Поддерживается для политики на входе и на выходе.

Маркирование DSCP: назначение пакету информации определённого значения DSCP. Изменение битов IntPri метки QoS выполняется в соответствии с таблицей соответствий между значениями DSCP и идентификаторами выходных очередей. Поддерживается для политики на входе и на выходе. Простое ограничение скорости передачи: действие, обеспечивающее простое ограничение

скорости передачи трафика. Поддерживается только для политики на входе. Двухскоростное устройство ограничение скорости передачи: позволяет ограничивать скорость передачи данных до двух определённых значений. Поддерживается только для политики на входе.

2.4. Разработка алгоритма обслуживания пакетов в очередях коммутатора

Управление выходным буфером. Предусмотрена поддержка максимум 8 выходных очередей по приоритету. Для каждой очереди предусмотрен конфигурируемый минимальный гарантированный размер и максимальный допустимый размер. Оба значения указываются в количестве кадров (вне зависимости от размера кадра) в диапазоне от 0 до 256 кадров. По умолчанию для всех 8 очередей на всех интерфейсах устанавливается минимальный и максимальный размер равный 32 кадрам.

Установление соответствий очередей. В метке QoS в дополнение к прочей информации также передаётся информация о внутреннем приоритете кадра (IntPri - номер очереди). На этом этапе кадры назначаются выходным очередям по приоритету.

Предусмотрена поддержка таблиц соответствий для значений CoS, DSCP и IP-приоритета.

Применяются следующие правила:

- классификация режима с доверием: выполнение поиска битов IntPri для доверенного поля с использованием таблицы соответствий. Для режима trust dot1p (доверенное поле dot1p) и опции untrusted (без доверия) используется таблица соответствий dot1p. Для режима trust DSCP (доверенное поле DSCP) используется таблица соответствий DSCP. Для режима trust IP Precedence (доверенное поле IP-приоритета) используется таблица соответствий IP-приоритета;
- политика на входе/на выходе: действия маркирования (маркирование CoS/DSCP/IP- приоритета или маркирование при ограничении скорости

передачи), обеспечивающие непосредственную установку битов IntPri в значение идентичное значению маркируемых полей CoS.

Предотвращение перегрузки. Механизм предотвращения перегрузки вступает в действие непосредственно перед назначением кадров выходным очередям по приоритету. Цель реализации этого механизма состоит в предотвращении заполнения очередей кадрами с последующим неконтролируемым "отбрасыванием хвоста" кадров. Для продукта предусмотрена поддержка двух алгоритмов предотвращения перегрузки, "отбрасывание хвоста" и взвешенное произвольное раннее обнаружение.

"Отбрасывание хвоста" представляет собой простейший из возможных методов предотвращения перегрузки. Это может привести к возникновению следующих проблем:

- "отбрасывания хвоста" не обеспечивает разделение кадров на "более важные" и "менее важные".
- "отбрасывания хвоста" нецелесообразно использовать, если в сети ожидается пульсирующий трафик TCP, поскольку его применение может повлечь за собой глобальную синхронизацию сеансов TCP, что может привести к неполному использованию доступной полосы пропускания.
- весь объем памяти может быть задействован для обработки более агрессивных потоков трафика, что приведёт к недостатку ресурсов для обработки других потоков трафика.

Конфигурируемых параметров не предусмотрено. Пользователь может только активизировать или деактивировать механизм "отбрасывания хвоста" для каждой очереди на каждом интерфейсе.

Взвешенное произвольное раннее обнаружение (WRED; Weighted Random Early Detection) является более совершенным алгоритмом предотвращения перегрузки, поскольку оно обеспечивает возможность заблаговременного выборочного отбрасывания определённых пакетов до заполнения очередей. В отличие от алгоритма "отбрасывания хвоста" алгоритм WRED является идеальным для обработки пульсирующего трафика TCP,

поскольку он обеспечивает эффективное предотвращение глобальной синхронизации сеансов TCP. Алгоритм WRED реализуется на основе алгоритма RED (управление переполнением очередей маршрутизаторов).

Управление перегрузкой (диспетчеризация). Наиболее часто перегрузка входных очередей происходит из-за разницы между интенсивностью входящего и исходящего потоков кадров.

Если кадры поступают на входной интерфейс быстрее, чем покидают его, рано или поздно происходит перегрузка очередей. В этом случае методы управления перегрузкой должны обеспечить диспетчеризацию очередей в соответствии с определёнными правилами.

Обслуживание очередей обеспечивается планировщиком, передающим кадры в аппаратную очередь FIFO, а затем на физическую линию.

Диспетчеризация выходных очередей по приоритету вместе с классификацией на входе представляет собой основной механизм QoS. В случае точного определения правил классификации на входе постановка кадров в очередь должна производиться в соответствии с их приоритетом. Так, в сети для речевого трафика назначается более высокий приоритет, чем для трафика данных.

Для обслуживания очередей существует два основными алгоритмами диспетчеризации: обслуживание по строгому приоритету и взвешенное циклическое обслуживание.

Обслуживание по строгому приоритету (SP - Strict Priority) представляет собой основной алгоритм диспетчеризации [107]. Каждой очереди назначается так называемый приоритет, определяющий приоритет обслуживания очереди по отношению к другим очередям. Обслуживание очереди с наиболее высоким приоритетом в системе очередей выполняется, пока в этой очереди не заканчиваются кадры. После этого планировщик переходит к обслуживанию очереди со следующим приоритетом и т. д. На примере, приведённом на рисунке 2.3 показана процедура обслуживания трёх очередей в режиме диспетчеризации SP.

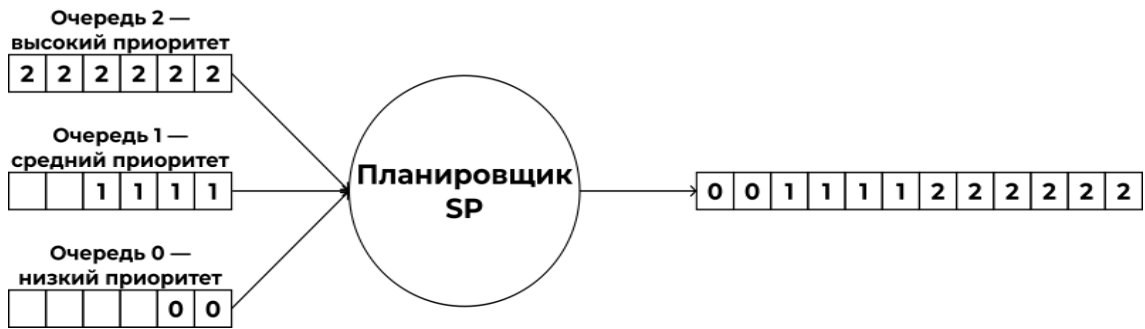


Рисунок 2.3 — Процедура обслуживания трёх очередей в режиме диспетчеризации по строгому приоритету - SP

В соответствии с рисунком обслуживание очереди 2 с наиболее высоким приоритетом выполняется, пока в ней находятся какие-либо кадры. После этого выполняется обслуживание со средним приоритетом в конце выполняется обслуживание очереди с низким приоритетом.

Главное преимущество обслуживания по строгому приоритету заключается в возможности обеспечения привилегированного обслуживания кадров, для которых необходимо обеспечить абсолютный приоритет по отношению к остальным. С другой стороны, если для такого трафика выделяется очень большая полоса пропускания, может возникнуть нехватка ресурсов для обработки других очередей, поскольку выделяемая для них полоса пропускания будет очень малой или её выделение будет невозможным.

Обслуживание по строгому приоритету целесообразно использовать при обработке высокоприоритетного трафика с малой полосой пропускания, для которого необходимо обеспечить абсолютный приоритет обработки по отношению к другим типам трафика, которым так или иначе назначен аналогичный приоритет (все типы трафика направляются в одну очередь). Но в сетях с разделением трафика по нескольким приоритетам, для каждого из которых требуется собственная полоса пропускания и время максимальной задержки, такой вариант не является оптимальным.

Взвешенное циклическое обслуживание (WRR; Weighted Round Robin) является более совершенным алгоритмом диспетчеризации. Он обеспечивает обработку очередей в режиме циклического обслуживания, т. е. в таком режиме

происходит переход от одной очереди к другой и принимается решение о необходимости отправки кадра из текущей очереди. Для этого алгоритма предусмотрен параметр "кредит", связанный с каждой очередью и определяющий количество пакетов, подлежащих отправке из очереди в рамках каждого цикла. При отправке пакета происходит уменьшение значения кредита. Максимальное значение кредита равно весу очереди.

При уменьшении всех кредитов до 0 производится обновление их значений. Цикл представляет собой период времени между двумя последовательными операциями обновления значения кредита. Количество пакетов, отправляемых в пределах одного цикла, равно сумме всех значений веса. Внутренний цикл представляет собой период времени в пределах цикла между двумя последовательными операциями обслуживания одной очереди. Таким образом, в пределах одного внутреннего цикла выполняется обслуживание одной очереди.

В случае использования простого алгоритма циклического обслуживания в пределах одного цикла из всех очередей отправлялось бы равное количество кадров (или байтов в зависимости от реализации). Другими словами, цикл был бы равен внутреннему циклу, поскольку значения веса всех очередей были бы равны 1. Но в случае алгоритма взвешенного циклического обслуживания каждой очереди присваивается вес, определяющий количество кадров, отправляемых из этой очереди в пределах одного цикла.

Пример, приведённый на рисунке 2.4, иллюстрирует реализацию алгоритма WRR. За один цикл передаётся 6 кадров. Суммарный вес цикла - 14. Для очереди 2 установлено значение веса 3, для очереди 1 установлено значение веса 2, а для очереди 0 установлено значение веса 1. Это значит, что в пределах одного цикла из очереди 2 выполняется отправка 3 кадров, из очереди 1 выполняется отправка 2 кадров, а из очереди 0 выполняется отправка 1 кадра. Следует помнить, что в случае алгоритма WRR значение веса 0 является недействительным. Вес каждой очереди должен быть установлен в значение не меньше 1.

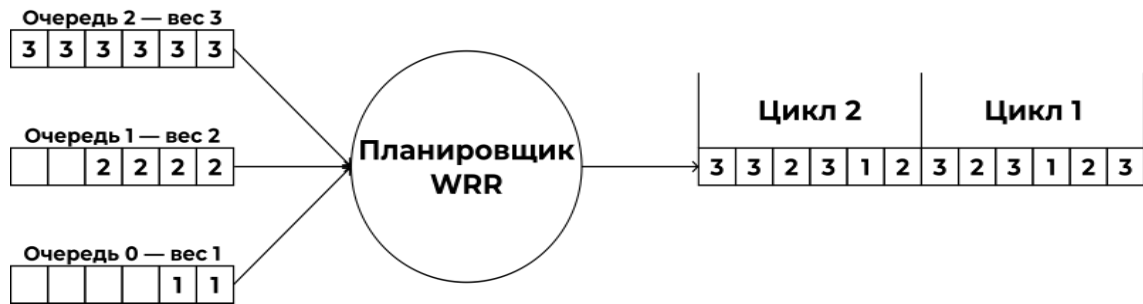


Рисунок 2.4 — Обслуживание по алгоритму взвешенного циклического обслуживания - WRR

По сравнению с алгоритмом обслуживания по строгому приоритету алгоритм взвешенного циклического обслуживания обеспечивает намного более сбалансированную обработку, поскольку при его использовании исключается вероятность нехватки ресурсов для обслуживания какой-либо из очередей. Но он определённо не является самым оптимальным алгоритмом. Размер кадров в одной очереди может значительно превышать размер кадров в других очередях. Это значит, что для одной из очередей может быть выделена неравная полоса пропускания в соответствии с её весом. Фактически игнорирование размера кадров является основной проблемой, связанной с использованием алгоритма WRR. Можно значительно снизить её влияние путём подсчёта количества передаваемых байтов вместо подсчёта пакетов информации, но в краткосрочной перспективе некоторая несбалансированность останется.

Для компактного анализа основных этапов обслуживания пакетов информации в очередях коммутатора на рисунке 2.5 приведена последовательность обслуживания пакетов информации в очередях коммутатора.

Последовательность обслуживания пакетов информации в очередях коммутатора



Рисунок 2.5 — Последовательность обслуживания пакетов информации в очередях коммутатора

Выводы по разделу 2

1. Анализ функций кодирования информации в шлюзах узла доступа позволил рекомендовать типы кодеков для сжатия текста, изображений, аудио, видео.
2. В технологии Ethernet с помощью стандарта IEEE 802.1Q образуются виртуальные локальные сети VLAN для логического деления пакетного коммутатора на не сообщающиеся между собой сети. Каждой VLAN назначается класс приоритета по обслуживанию QoS. Пакеты голосового трафика с высшим приоритетом обслуживания имеют минимальную задержку в очереди. К данным каждого кадра добавляется идентификатор для указания VLAN, к которой принадлежит кадр. Идентификатор IEEE 802.1Q позволяет пронумеровать 4094 VLAN. Дополнение 802.1ad к стандарту IEEE 802.1Q позволяет пронумеровать $4094 \times 4094 = 16\,760\,836$ VLAN. Приведён состав форматов кадров при реализации стандартов IEEE 802.3, IEEE 802.1Q, IEEE 802.1ad.
3. Значения CoS (Class of Service) во входящих кадрах, передаваемых по интерфейсу L2 на втором канальном уровне, должны быть доверенными. Режим доверия устанавливается с помощью специальной команды «mls qos trust cos» - доверять меткам CoS. Значения DSCP (DiffServ Code Point) во входящих пакетах, передаваемых по интерфейсу L3 на третьем сетевом уровне, также являются доверенными. Режим доверия (trust mode) ограничивает взаимодействие сторонних приложений – блокирует любое стороннее программное обеспечение.
4. В системе поллинга опрос очередей является циклическим. Для предотвращения монопольного захвата всего ресурса сервера при обслуживании одной очереди принята шлюзовая дисциплина обслуживания, при которой сервер обслуживает лишь те заявки, которые находились в очереди в момент начала её опроса. Заявки, поступившие в очередь после опроса, обслуживаются в следующем цикле.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ НЕНОРМИРОВАННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ОПРОСЕ ПРИОРИТЕТНЫХ ОЧЕРЕДЕЙ В КОММУТАТОРЕ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО УЗЛА ДОСТУПА

3.1. Структура и компоненты системы стохастического поллинга

Системы циклического опроса (системы поллинга - polling system), рассматриваемые в [61, 64, 65, 68], «являются разновидностью систем массового обслуживания с несколькими очередями $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ ». При конечном или счётном числе очередей система поллинга называется *дискретной*. Каждая очередь имеет свой поток пакетов. Обслуживающий прибор (сервер) по определённому правилу посещает очереди и обслуживает находящиеся в них пакеты информации.

На рисунке 3.1 приведены основные параметры дискретных систем поллинга. Жирным шрифтом показаны параметры, принятые в рассматриваемой задаче.

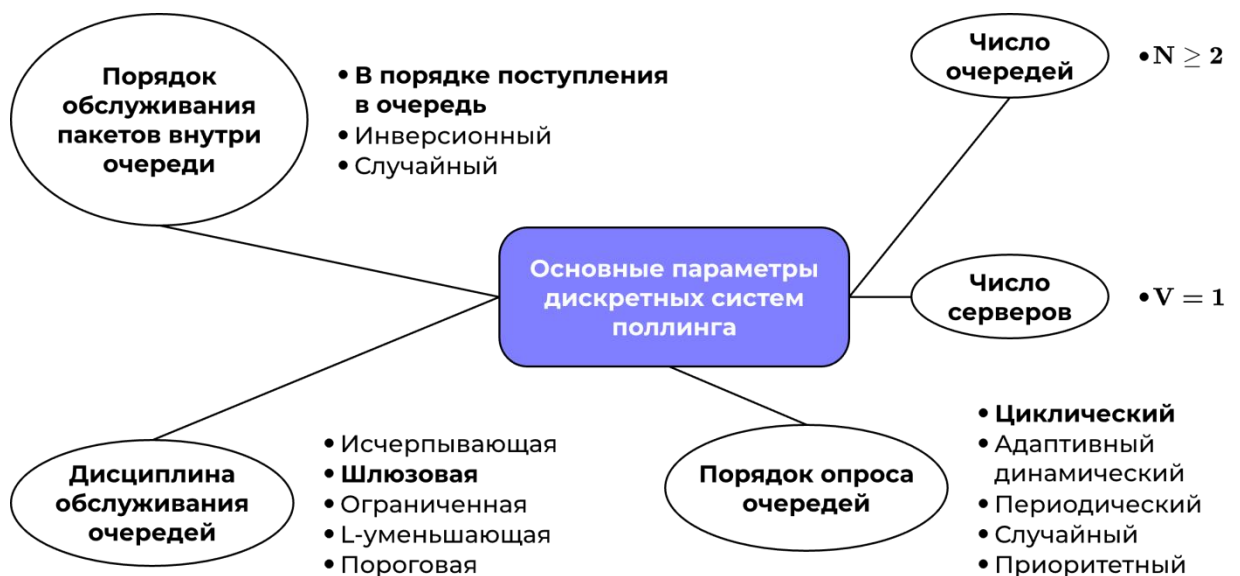


Рисунок 3.1 — Основные параметры дискретных систем поллинга

Процесс работы системы. Сервер подключается к каждой очереди в соответствии с установленным правилом, называемым *порядком опроса*. Наиболее

распространённым порядком опроса является *циклический опрос*, при котором сервер последовательно опрашивает очереди от первой до последней, а затем возвращается к первой. Если очередь пуста, сервер отключается и начинает подключаться к следующей очереди. В противном случае он начинает обслуживать пакеты в очереди в соответствии с дисциплиной обслуживания, которая определяет количество пакетов информации, обрабатываемых сервером за одно посещение очереди.

Кадры и пакеты после маркировки на уровнях $L2$ и $L3$ размещаются в очередях $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ в порядке убывания приоритета.

Цикл – это последовательность опроса сервером всех очередей от Q_1 до Q_N , $N \geq 2$. Циклический опрос называется *статическим*, если правило выбора очередей не изменяется в ходе работы.

Количество мест для ожидания в каждой очереди будем считать бесконечным. *Дисциплина обслуживания* определяет количество пакетов, которые сервер обрабатывает за одно посещение очереди. В рассматриваемой модели принята *шлюзовая дисциплина обслуживания*: все заявки, ожидающие в очереди в момент её опроса, будут обслужены в текущем цикле [107]. При этом заявки, которые поступают в очередь в период её обслуживания сервером, получают обслуживание лишь в следующем цикле. Это исключает монопольное использование сервера одной очередью.

Начало опроса очереди – момент, когда сервер завершил переключение и готов начать обслуживание очереди.

Посещение сервером очереди – это период времени, включающий опрос очереди сервером и последующее её обслуживание, если в очереди есть заявки.

Время, которое затрачивает сервер на перенастройку для обслуживания следующей по порядку очереди, называется *временем переключения*.

Ещё одним параметром системы является *дисциплина обслуживания заявок в очереди* – это порядок, в котором обслуживаются заявки, подлежащие обслуживанию при текущем посещении сервером очереди. Далее будем считать,

что обслуживание пакетов в очереди осуществляется в порядке поступления в очередь.

Циклический опрос очередей приводит к задержкам в обслуживании трафика. Для оценки величины задержки трафика в очередях используются методы производящих функций и анализа средних длин очередей [76, 107, 115].

Модель системы стохастического поллинга. На рисунке 3.2 приведена простейшая модель системы стохастического поллинга.

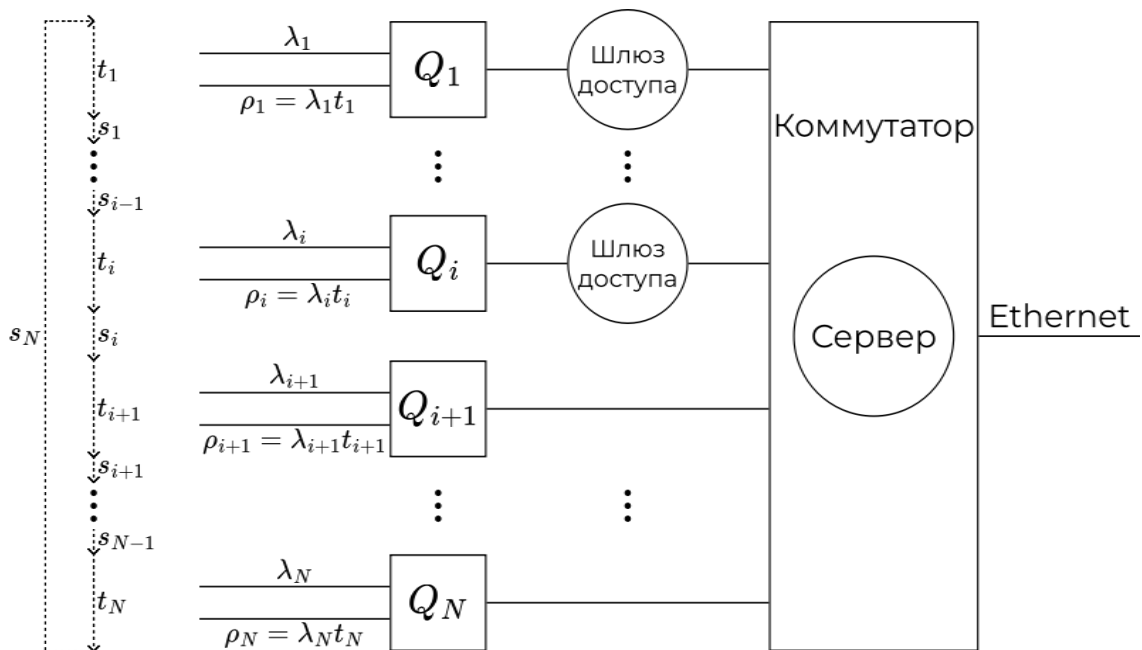


Рисунок 3.2 — Простейшая модель системы стохастического поллинга

Обозначения в модели системы стохастического поллинга:

Q_i - обозначение i -ой очереди, $i = \overline{1, N}$, в которой:

λ_i - параметр стационарного потока пакетов информации в i -ой очереди;

t_i - средняя длительность обслуживания одного пакета в i -ой очереди;

s_i - среднее время подключения сервера к i -ой очереди;

ρ_i - средняя интенсивность нагрузки в i -ой очереди;

$S = \sum_{i=1}^N s_i$ - суммарное время переключения сервера за один цикл;

$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i$ - суммарная интенсивность нагрузки системы стохастического поллинга

за один цикл.

Времена обслуживания заявок в очереди Q_i независимы и одинаково распределены с показательной функцией распределения, со средним значением длительности обслуживания одного пакета в i -ой очереди t_i .

Средняя интенсивность поступающей нагрузки i -ой очереди $\rho_i = \lambda_i t_i$.

Среднее время цикла C складывается из времени обслуживания всех очередей (доля времени ρ от C) и времени переключения между очередями S за цикл, то есть $C = \rho C + S$, откуда среднее время цикла $C = S / (1 - \rho)$.

3.2. Краткий анализ работ по стохастическому поллингу

Анализ работ. Результаты работ в области анализа систем стохастического поллинга до 1985 г. проведён в обзоре Х. Такаги [61]. Дальнейшее развитие теоретических результатов в этом направлении, опубликованных до 1995 г., отражено в книге С. Борста [62]. Анализ математических методов исследования систем поллинга приведён в статье Вишневого В. М. и Семёновой О. В. в 2006 г. в журнале «Автоматика и телемеханика» [63].

Период публикаций с 1996 по 2009 год подробно отражён в обзоре [64].

В 2018 году О. Боксма и С. Борста в [66] опубликовали обзор методов анализа систем с циклическим опросом и одним сервером.

Достаточно полный обзор последних работ по моделям поллинга по применению к анализу телекоммуникационных сетей содержится в статьях Вишневого В. М. и Семёновой О. В. в журнале «Проблемы информатики» [66, 67].

Краткий анализ методов. Большинство работ по методам анализа различных систем поллинга сводятся к *методу производящих функций* [68], позволяющему во многих случаях находить точное решение, и *методу приближенных вычислений средних длин очередей* [69], наиболее удобному для алгоритмизации и получения количественных оценок.

В статье [70] для системы поллинга типа $M/G/1$ с циклическим опросом получены функциональные соотношения для производящих функций стационарных вероятностей состояний системы в моменты опроса очередей сервером, отключения сервера от очереди, моменты начала и завершения обслуживания пакета в очереди.

Метод, основанный на использовании обобщённых марковских процессов с целью нахождения функциональных соотношений для характеристик производительности, подробно описан в работе Т. Хираямы [72].

Условия существования стационарного режима в системах поллинга детально исследованы и обобщены в статье [72]. Вопросам существования стационарного режима также посвящена работа [73].

В работе [75] рассмотрен вопрос о справедливости дисциплин обслуживания в системах поллинга. Рассматриваются следующие дисциплины: шлюзовая, исчерпывающая, биномиально-шлюзовая, двухфазная шлюзовая и глобально-шлюзовая.

Дальнейшее развитие методов анализа совместно с новейшими результатами в данной области, относятся, в основном, к анализу широкополосных беспроводных сетей связи [75, 76].

3.3. Итерационная схема расчёта стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$ и среднего времени цикла C

Достаточным условием существования стационарного режима для системы стохастического поллинга является выполнение неравенства:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i < 1,$$

где $\rho_i = \lambda_i t_i$ – интенсивность нагрузки очереди Q_i [76, 77, 115].

Под временем цикла понимается длительность обслуживания очередей с Q_1 по Q_N . Пусть также u_i есть стационарная вероятность того, что очередь Q_i будет опрошена в произвольном цикле, $i = \overline{1, N}$.

В соответствии с [76, 115], значения среднего времени цикла C и стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$, удовлетворяют системе нелинейных уравнений (3.1) и (3.2).

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{1 + e^{-\lambda_i C^n}}, \quad i = \overline{1, N} \quad (3.1)$$

$$C^{n+1} = \frac{1}{1 - \rho} \left[\sum_{i=1}^N s_i u_i^{n+1} + \beta \prod_{i=1}^N (1 - u_i^{n+1}) \right], \quad n > 0 \quad (3.2)$$

Система уравнений (3.2–3.3) решается с применением итерационного метода простых итераций [115].

Блок-схема алгоритма вычислений стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$ и значения среднего времени цикла C приведена на рисунке 3.3. Блок-схема достаточно детальна, поэтому нет необходимости детально рассматривать алгоритм решения системы уравнений (3.1–3.2).

Реализация алгоритма метода простых итераций вычислений стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$ и среднего времени цикла C ниже рассмотрена на примере простейшей системы стохастического поллинга, состоящей из трёх очередей Q_1, Q_2, Q_3 , $N = 3$ и сервер российской фирмы Eltex производительностью $V_{\text{сервер}} = 12.8$ Гбит/с ($12.8 \cdot 10^9$ бит/с), обслуживающего следующие сообщения: голосовые, видеоконференцсвязи (ВКС) и передачи данных (ПД) [115].

Исходные данные для примера вычислений по выражениям (3.2–3.3).

Исходные данные для примера вычислений по алгоритму, приведённому на рисунке 3.3, представлены в таблице 3.1 [115].

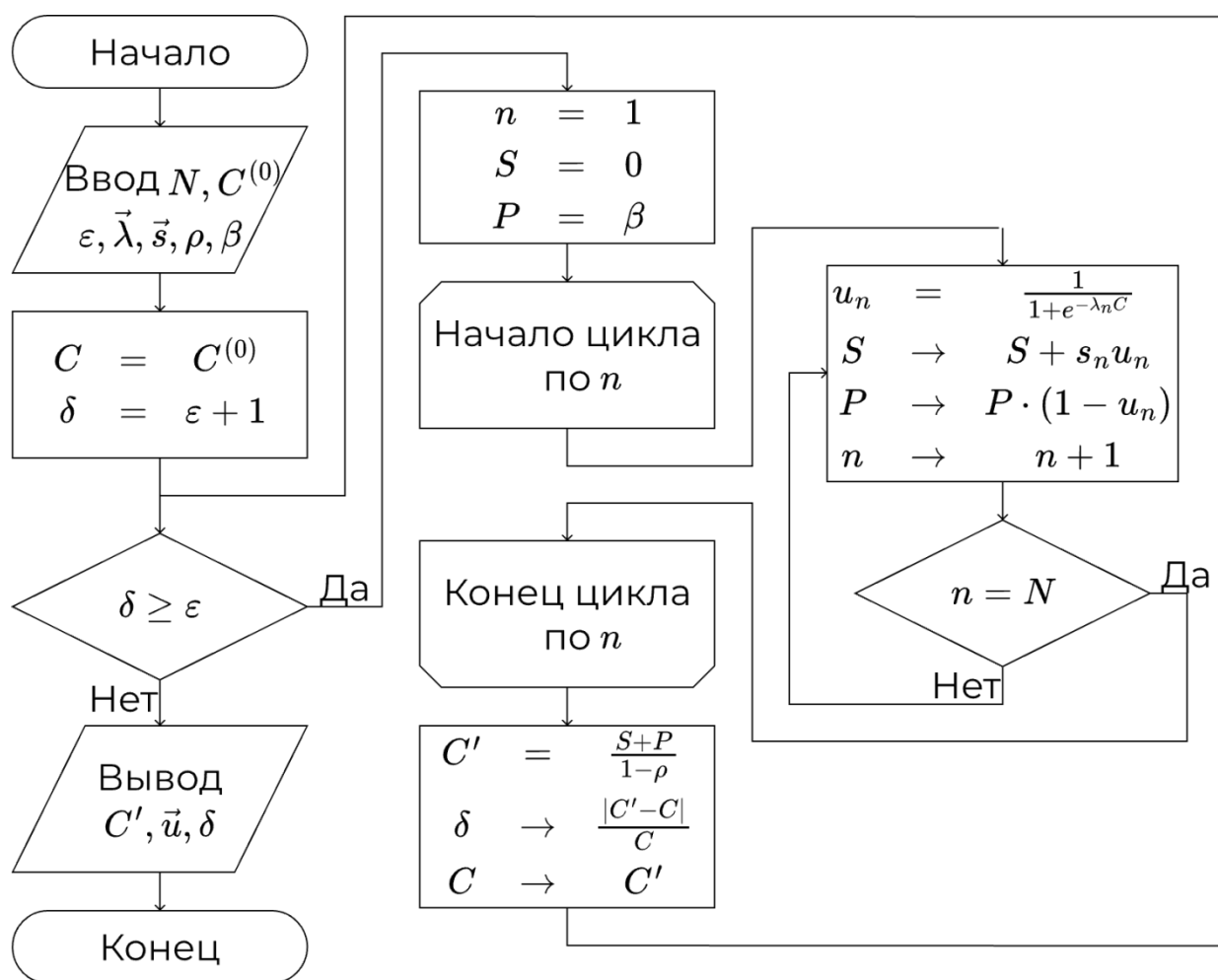


Рисунок 3.3 — Блок-схема алгоритма метода простых итераций вычислений стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$, и среднего времени цикла C

Таблица 3.1 — Значения параметров сообщений голосовых, ВКС, ПД

№	Параметры сообщений	Значения параметров
Голосовые сообщения		
1.	Число пользователей голосового трафика	$n_{\text{гол}} = 10 \cdot 10^3$
2.	Среднее число поступающих сообщений (вызовов) от одного пользователя в час наибольшей нагрузки (ЧНН) [79]	$c_{\text{чнн}} = 3$
3.	Средняя длительность одного вызова [79]	$t_{\text{выз}} = 72 \text{ с}$
4.	Тип голосового кодека	G.711
5.	Параметры кодека G.711: — размер голосового пакета — значение длительности пакета — размер голосового кадра Ethernet	$d_{\text{пак}} = 160 \text{ байт};$ $t_{\text{пак}} = 20 \text{ мс};$ $d_{\text{кадр}} = 218 \text{ байт}.$

Продолжение таблицы 3.1

	Сообщения видеоконференцсвязи (ВКС)	
6.	Разрешение ВКС в ЧНН	1 280×720
7.	Частота кадров ВКС в ЧНН	25 кадров/с
8.	Тип видео кодека	H.264
9.	Параметры кодека H.264: — скорость канала	$V_{\text{ВКС}} = 5$ Мбит/с
10.	Длительность одной ВКС в ЧНН	$t_{\text{ВКС}} = 45$ мин
11.	Число ВКС в ЧНН	$n_{\text{ВКС}} = 3$
	Сообщения передачи данных (ПД)	
12.	Число пользователей ПД в ЧНН	$n_{\text{ПД}} = 10$
13.	Один пользователь скачивает данные со скоростью	$V_{\text{ПД}} = 10$ Мбит/с
14.	Длительность одного сообщения ПД	$t_{\text{ПД}} = 5$ мин
15.	Объём информации одного пакета ПД	$d_{\text{Ethernet}} = 1460$ байт
	Параметры сервера	
16.	Производительность сервера управления очередями	$V_{\text{сервер}} = 12.8$ Гбит/с
17.	Время переключения между очередями	$s_i = 3$ мкс

Ниже приведён алгоритм вычисления интенсивностей нагрузки сервера при обслуживании голосовых, ВКС и ПД сообщений в ЧНН ($t_{\text{ЧНН}} = 3600$ с).

Обслуживание голосовых сообщений.

Шаг 1. Вычисление суммарного числа поступающих голосовых сообщений (вызовов) в ЧНН на узел доступа от всех пользователей голосовой связи:

$$c_{\text{выз}} = c_{\text{ЧНН}} n_{\text{гол}} = 3 \cdot 10 \cdot 10^3 = 30 \cdot 10^3 \text{ вызовов/ЧНН}$$

Шаг 2. Вычисление числа голосовых пакетов в одном голосовом вызове при средней его длительности $t_{\text{выз}} = 72$ с:

$$n_{\text{пак}} = \frac{t_{\text{выз}}}{t_{\text{пак}}} = \frac{72}{20 \cdot 10^{-3}} = 3.6 \cdot 10^3 \text{ пакетов}$$

Шаг 3. Вычисление среднего числа кадров во всех поступивших вызовах в ЧНН в узел доступа (интенсивность голосовых пакетов):

$$\lambda_{\text{гол}} = n_{\text{пак}} c_{\text{выз}} = 3.6 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^3 = 108 \cdot 10^6 \text{ кадр/ЧНН}$$

Шаг 4. Вычисление объёма информации от одного голосового вызова:

$$d_{\text{выз}} = d_{\text{кадр}} n_{\text{пак}} = 218 \cdot 8 \cdot 3 = 6.2784 \cdot 10^6 \text{ бит}$$

Шаг 5. Вычисление объёма информации от всех голосовых вызовов в ЧНН

$$d_{\text{сумм}} = d_{\text{выз}} c_{\text{выз}} = 6.2784 \cdot 10^6 \cdot 30 \cdot 10^3 = 188.352 \cdot 10^9 \text{ бит}$$

Шаг 6. Вычисление времени занятия сервера при обслуживании всех голосовых сообщений в ЧНН:

$$t'_{\text{гол}} = \frac{d_{\text{сумм}}}{V_{\text{сервер}}} = \frac{188.352 \cdot 10^9}{12.8 \cdot 10^9} = 14.715 \text{ с}$$

Шаг 7. Вычисление интенсивности нагрузки на обслуживание голосовых сообщений сервером в ЧНН:

$$\rho_{\text{гол}} = \frac{t'_{\text{гол}}}{t_{\text{чнн}}} = \frac{14.715}{3600} = 0.0040875 \text{ Эрл}$$

Обслуживание сообщений видеоконференцсвязи (ВКС).

Шаг 8. Пусть для ВКС с разрешением HD — 1280×720, $f_{\text{кадр}} = 25$ кадров/с, при кодеке H.264 скорость канала $V_{\text{вкс}} = 5$ Мбит/с. Число ВКС $n_{\text{вкс}} = 3$.

Шаг 9. Вычисление объёма информации, переданной одной ВКС в ЧНН за $t_{\text{вкс}} = 45$ мин:

$$d_{\text{вкс}} = V_{\text{вкс}} t_{\text{вкс}} = 5 \cdot 10^6 \cdot 45 \cdot 60 = 13.5 \cdot 10^9 \text{ бит}$$

Шаг 10. Вычисление объёма информации, переданной $n_{\text{вкс}} = 3$ ВКС в ЧНН:

$$d_{\text{сумм}} = d_{\text{вкс}} n_{\text{вкс}} = 13.5 \cdot 10^9 \cdot 3 = 40.5 \cdot 10^9 \text{ бит}$$

Шаг 11. Вычисление интенсивности кадров $n_{\text{вкс}} = 3$ ВКС в ЧНН:

$$\lambda_{\text{вкс}} = f_{\text{кадр}} t_{\text{вкс}} n_{\text{вкс}} = 25 \cdot 45 \cdot 60 \cdot 3 = 202.5 \cdot 10^3 \text{ кадр/ЧНН}$$

Шаг 12. Вычисление длительности обслуживания сервером $n_{\text{вкс}} = 3$ ВКС в ЧНН:

$$t'_{\text{вкс}} = \frac{d_{\text{сумм}}}{V_{\text{сервер}}} = \frac{40.5 \cdot 10^9}{12.8 \cdot 10^9} = 3.164 \text{ с}$$

Шаг 13. Вычисление интенсивности нагрузки сервера на обслуживание $n_{\text{вкс}} = 3$ ВКС в ЧНН:

$$\rho_{\text{вкс}} = \frac{t'_{\text{вкс}}}{t_{\text{чнн}}} = \frac{3.164}{3600} = 0.0008789 \text{ Эрл}$$

Обслуживание сообщений передачи данных (ПД).

Шаг 14. Вычисление объёма информации в ЧНН от 1 пользователя ПД за $t_{\text{пд}} = 5$ мин каждый:

$$d_{\text{пд}} = V_{\text{пд}} t_{\text{пд}} = 10 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 60 = 3 \cdot 10^9 \text{ бит}$$

Шаг 15. Вычисление общего объёма информации в ЧНН от всех пользователей ПД:

$$d_{\text{сумм}} = d_{\text{пд}} n_{\text{пд}} = 3 \cdot 10^9 \cdot 10 = 30 \cdot 10^9 \text{ бит}$$

Шаг 16. Вычисление интенсивности кадров ПД:

$$\lambda_{\text{пд}} = \frac{d_{\text{сумм}}}{d_{\text{Ethernet}}} = \frac{30 \cdot 10^9}{1460 \cdot 8} = 2.568 \cdot 10^6 \text{ кадр/ЧНН}$$

Шаг 17. Вычисление длительности обслуживания $n_{\text{пд}} = 10$ ПД в ЧНН

$$t'_{\text{пд}} = \frac{d_{\text{сумм}}}{V_{\text{сервер}}} = \frac{30 \cdot 10^9}{12.8 \cdot 10^9} = 2.344 \text{ с}$$

Шаг 18. Вычисление интенсивности нагрузки сервера при обслуживании 10 пользователей ПД в ЧНН:

$$\rho_{\text{пд}} = \frac{t'_{\text{пд}}}{t_{\text{чнн}}} = \frac{2.344}{3600} = 0.0006510 \text{ Эрл}$$

Расчёт суммарной интенсивности нагрузки.

Шаг 19. Суммарная интенсивность нагрузки при обслуживании сервером всех кадров трёх очередей в ЧНН:

$$\rho = \rho_{\text{гол}} + \rho_{\text{вкс}} + \rho_{\text{пд}} = 0.0040875 + 0.0008789 + 0.0006510 = 0.0056174 \text{ Эрл}$$

Расчёт стационарных вероятностей u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$.

В расчётах использован калькулятор экспоненты [78]. Для наиболее часто используемых голосовых кодеков в таблице 3.2 приведён словарь, в котором ключ показывает тип голосового кодека. Для каждого кодека приведено значение длительности пакета в мс и объём кадра в байтах.

Таблица 3.2 — Ключи и значения словаря для кодеков

Ключ	Значение ($t_{\text{пак}}$ в мс, $d_{\text{кадр}}$ в байтах)
G.711	(20, 218)
G.726	(20, 138)
G.728	(20, 98)
G.729	(20, 78)

Принято следующее начальное условие [115]:

$$C^0 = S / (1 - \rho) = 9.051 \text{ мкс}, u_1^0 = u_2^0 = u_3^0 = 0.5$$

Результаты расчётов параметров C , u_1 , u_2 , u_3 в примере с помощью простого итерационного процесса приведены в таблице 3.3 [115].

Таблица 3.3 — Результаты расчётов параметров C , u_1 , u_2 , u_3 с помощью простого итерационного процесса

n	C^n , мкс	$ C^n - C^{n-1} $, нс	u_1^n	u_2^n	u_3^n
0	9.050843	-	0.5	0.5	0.5
1	8.634789	416.054	1.0	0.86209	1.0
2	8.603638	31.151	1.0	0.851770	1.0
3	8.601230	2.408	1.0	0.850971	1.0
4	8.601043	0.187	1.0	0.850909	1.0
5	8.601029	0.014	1.0	0.850904	1.0

Простой итерационный процесс обеспечивает высокую точность сходимости. В приведённом примере при пяти итерациях отличие на соседних шагах значений C составляет $14 \times 10^{-12} \text{ с} = 0.014 \text{ нс}$.

3.4. Метод расчёта среднего числа заявок L_i в очереди $Q_i, i = \overline{1, N}$

Дисциплина обслуживания очереди — это принцип, по которому сервер выбирает заявки из очереди для обслуживания. При шлюзовой дисциплине «сервер обслуживает лишь те заявки, которые находились в очереди в момент её опроса» [64, 65, 68]. Заявки, поступающие в очередь после опроса, обслуживаются в следующем цикле [107, 114, 115].

Вероятность того, что все очереди в цикле будут пропущены и сервер остановится на случайное время [107]:

$$u = \prod_{i=1}^N (1 - u_i^{n+1})$$

В рассматриваемом примере (таблица 3.1), так как $u_1 = 1$, то $u = 0$.

Время пребывания сервера у очереди $Q_i, i = \overline{1, N}$:

$$T_i = \rho_i C + s_i(u_i + u) + \frac{u\beta}{N}$$

где β — время прогулки сервера. Так как $u = 0$, в данном случае оно не учитывается, а также получаем что:

$$T_i = \rho_i C + s_i u_i \quad (3.3)$$

Под (i, j) -м периодом понимается сумма j последовательных периодов посещения сервером очередей, начиная с Q_i . Средняя продолжительность (i, j) -го периода определяется по выражению (3.4):

$$T_{i,j} = \sum_{n=i}^{i+j-1} T_n, \quad i, j = \overline{1, N} \quad (3.4)$$

Доля времени, которое сервер проводит в периоде (i, j) , есть отношение средней длительности периода (i, j) в цикле к средней продолжительности цикла:

$$q_{i,j} = \frac{T_{i,j}}{C}, \quad i, j = \overline{1, N} \quad (3.5)$$

Пусть L_i есть среднее число заявок в очереди Q_i , когда сервер занят обслуживанием очереди Q_i , $i = \overline{1, N}$.

Среднее число заявок в очереди Q_i может быть выражено через условные величины $L_{i,j}$ при исчерпывающей дисциплине обслуживания следующим образом:

$$L_i = \sum_{n=1}^N q_{n,1} \tilde{L}_{i,n} + q_{i,1} \frac{\rho_i}{u_i} \bar{L}_i, \quad i = \overline{1, N} \quad (3.6)$$

При шлюзовой дисциплине обслуживания очереди Q_i , условное среднее L_i определяется суммой двух слагаемых:

$\bar{L}_i$ — среднее число заявок, обслуживаемых сервером за время посещения очереди Q_i ;

$\tilde{L}_{i,n}$ — среднее число заявок, поступивших в очередь при опросе и после опроса i -ой очереди. Значения числа заявок определяются по формуле (3.7).

$$\sum_{n=i}^{i+j-1} \frac{q_{n,1}}{q_{i,j}} \tilde{L}_{i,n} = \lambda_i \left(T_{i,j} + \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N s_m u_m \right), \quad i, j = \overline{1, N} \quad (3.7)$$

Расчёт длины очереди $\tilde{L}_{i,n}$ в период (i, j) выполняется с помощью двух циклов: цикл по $i = \overline{1, N}$ (здесь i — номер очереди) и вложенный цикл по $j = \overline{1, N}$.

Длина очереди $\tilde{L}_{i,n}$ в период (i, j) — это число заявок, которое поступит в очередь в течение рассматриваемого периода [68].

В системе уравнений (3.7) значения параметров T_i , $T_{i,j}$ и $q_{i,j}$ рассчитываются по выражениям (3.3), (3.4) и (3.5) соответственно. Блок-схема алгоритма расчёта $\tilde{L}_{i,n}$ по формуле (3.7) приведена на рис. 3.4.

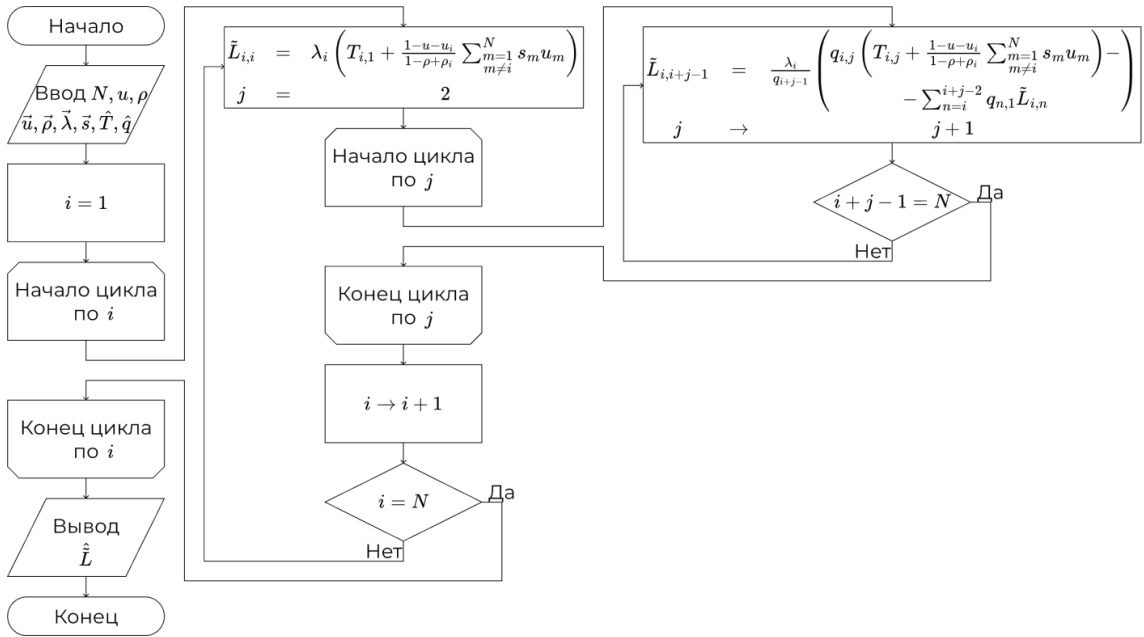


Рисунок 3.4 — Блок-схема алгоритма расчёта $\tilde{L}_{i,n}$ по формуле (3.7)

Среднее число заявок, которое будет обслужено сервером за время посещения очереди Q_i , вычисляется по выражению [68]:

$$\bar{L}_i = \lambda_i \frac{u_i}{\rho_i} \left(T_i + \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{m=1, m \neq i}^N s_m u_m \right) - (1-\rho_i) \frac{u_i}{\rho_i} \sum_{n=1}^N q_{n,1} \tilde{L}_{i,n} \quad (3.8)$$

На рисунке 3.5 приведена диаграмма поступления и обслуживания заявок при шлюзовой дисциплине обслуживания в системе стохастического поллинга из трёх очередей [115].

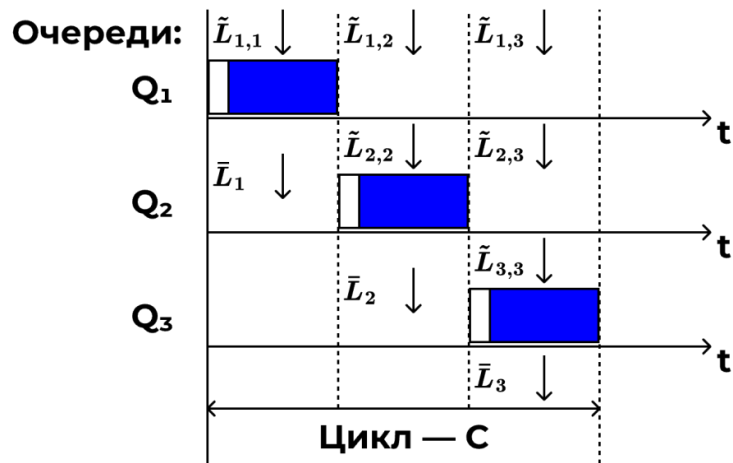


Рисунок 3.5 — Диаграмма поступления $\tilde{L}_{i,n}$ и обслуживания заявок в системе стохастического поллинга из трёх очередей

После вычисления значений $\tilde{L}_{i,n}$ и $\bar{L}_i$ по выражениям (3.7) и (3.8), среднее число заявок L_i в очереди Q_i вычисляется по выражению (3.6) [115].

Число уравнений для вычисления $\tilde{L}_{i,n}$, $\bar{L}_i$ и L_i при числе очередей N равно $N(N+1)$.

3.5. Оценка ненормированных задержек пакетов в очередях

Для определения среднего времени пребывания заявки в очереди можно воспользоваться теоремой Джона Литтла: «Долгосрочное среднее количество L_i требований в стационарной системе равно долгосрочной средней интенсивности λ_i входного потока, умноженной на среднее время W_i пребывания заявки в системе $L_i = \lambda_i W_i$ » [107]. В рассматриваемом случае:

$$W_i = \frac{L_i}{\lambda_i}, \quad i = \overline{1, N} \quad (3.9)$$

Для оценки полученных значений задержек рассмотрим, из каких составляющих складывается задержка при установлении голосового соединения.

В рекомендации МСЭ-Т G.114 по значению односторонней задержки от пользователя А до пользователя В выделено четыре уровня качества телефонной связи (таблица 3.4) [107].

Таблица 3.4 — Уровни качества телефонной связи

Уровни качества телефонной связи	Величина задержки	Качество связи
Первый	<150 мс	Отличное
Второй	<200 мс	Хорошее
Третий	<400 мс	Приемлемое
Четвёртый	<450 мс	Плохое

В голосовом шлюзе на исходящей стороне задержка составляет:

— 15÷20 мс — длительность пакетирования в зависимости от типа кодека;

- 10 мс — инкапсуляция в дейтаграмму для передачи по IP-сети;
- 10 мс — постановка в очередь;
- W_i — ожидание (задержка) в очереди Q_i .

Задержка при передаче кадров по IP-сети — от 50 мс и зависит от структуры сети (числа транзитных маршрутизаторов). Задержка в оптических каналах связи — порядка 5 мкс на один километр протяжённости канала [10].

Общие задержки «от говорящего до слушающего» складываются из двух составляющих — нормированных задержек и ненормированных задержек. Нормированные задержки — задержки, которые мало зависят от общей архитектуры сети, числа пользователей, типов трафика или требований на скорость передачи. К таким задержкам относятся: пакетизирование информации, инкапсуляция, постановка в очередь, управление шлюзами, организация и деление VLAN на классы обслуживания (на отправляющей стороне) и джиттер-буфер, медиашлюз с обратным преобразованием (на принимающей стороне). Ненормированные задержки, в свою очередь, зависят от всей архитектуры, типов трафика внутри сети и числа пользователей. Такие задержки возникают, как правило, в активном оборудовании обработки данных, к примеру: мультисервисные узлы доступа, межсетевые экраны и сервера.

Также нормируются показатели качества обслуживания в транспортной IP-сети. Согласно рекомендации МСЭ-Т Y.1541 [27], для QoS класса 0, предназначенного для высокоинтерактивного трафика реального времени, средняя задержка передачи IP-пакетов не должна превышать 100 мс, а вариация задержки — 50 мс (таблица 1.4).

Для иных типов трафика применяются другие классы QoS и соответствующие им нормативные значения: например, для класса 1 средняя задержка может составлять до 400 мс, а для класса 2 — до 100 мс при отсутствии отдельного требования к вариации задержки. Поэтому требование задержки до 100 мс нельзя распространять на IP-сеть в целом без указания используемого класса QoS.

Как видно из приведённых данных, ненормированные задержки пакетов информации $t_{\text{ож.оч}i}$ в очереди Q_i переводят уровень качества на третий уровень - «приемлемый», что может оказать существенное влияние на снижение качества телефонной связи.

3.6. Создание алгоритмического и программного обеспечения для расчёта ненормированных задержек пакетов информации в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа

Далее приведён алгоритм вычисления средних задержек заявок W_i в очередях Q_i , $i = \overline{1, N}$ с использованием выражений (3.3–3.9). Расчёт исходных данных приведён в разделе 3.3.

Расчёт длительности и доли (i, j) -го периода.

Шаг 1. По формуле (3.3) вычисляется длительность T_i пребывания сервера у очереди Q_i , $i = \overline{1, N}$. Значения C и u_i , $i = \overline{1, N}$ рассчитаны по (3.1–3.2) с учётом блок-схемы рис. 3.3.

Шаг 2. Длительность (i, j) -го периода $T_{i,j}$ вычисляется по выражению (3.4) как сумма последовательных периодов посещения сервером очередей, начиная с Q_i , $i = \overline{1, N}$.

Шаг 3. Доля времени $q_{i,j}$, которое сервер проводит в периоде (i, j) , вычисляется как отношение средней длительности (i, j) -го периода $v_{i,j}$ в цикле к средней продолжительности цикла C по формуле (3.5).

Расчёт среднего числа заявок, поступающих в очередь.

Шаг 4. В цикле по i выбирается очередное значение $i = \overline{1, N}$. В цикле по j выбирается $j = \overline{1, N}$. В случае $j = 1$ определяется значение $\tilde{L}_{i,1}$ по (3.7) как:

$$\tilde{L}_{i,i} = \lambda_i \frac{q_{i,j}}{q_{i,1}} \left(T_{i,1} + \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N s_m u_m \right), \quad j=1$$

Далее для каждого следующего j значение $\tilde{L}_{i,j}$ определяется рекуррентно из (3.7) следующим образом:

$$\tilde{L}_{i,i+j-1} = \frac{q_{i,j}\lambda_i}{q_{i+j-1,1}} \left(T_{i,j} + \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N s_m u_m \right) - \sum_{n=i}^{i+j-2} \frac{q_{n,1}}{q_{i+j-1,1}} \tilde{L}_{i,n}, \quad j > 1$$

Шаг 5. После нахождения всех $\tilde{L}_{i,j}$, определяется величина:

$$\sum_{n=1}^N q_{n,1} \tilde{L}_{i,n}$$

Шаг 6. В цикле по i выбирается очередное значение $i = \overline{1, N}$. Для каждого из i величина $\bar{L}_i$ определяется соответственно по (3.8).

Шаг 7. Среднее число заявок L_i в очереди Q_i , $i = \overline{1, N}$ рассчитывается по формуле (3.6).

Расчёт среднего числа заявок, поступающих в очередь.

Шаг 8. Из закона Джона Литтла, по (3.9) определяются задержки пакетов в очередях W_i , $i = \overline{1, N}$.

Для оценки задержек в очередях мультисервисных узлов доступа составлена программа для ЭВМ типа IBM PC на языке программирования Python, операционная система — GNU/Linux, объём программы — 78 229 кбайт.

Выводы по разделу 3

1. Анализ интенсивностей, поступающих в MSAN потоков информации, показал, что интенсивность голосовых сообщений обычно в сотни и даже в тысячи раз может превышать интенсивности других потоков. В этих условиях для предотвращения монопольного захвата сервера очередью с голосовыми сообщениями рекомендовано использовать шлюзовую дисциплину обслуживания. При этой дисциплине все пакеты, ожидающие в очереди в момент её опроса, будут обслужены в текущем цикле. Пакеты,

которые поступают в очередь в период её обслуживания сервером, получают обслуживание лишь в следующем цикле.

1. Из анализа литературы по стохастическому поллингу следует, что значения среднего времени цикла C и стационарных вероятностей u_i опроса очередей связывает система нелинейных уравнений (3.1) - (3.2) [115], которая решается итерационным методом простых итераций. Составлена блок-схема алгоритма, который реализован с помощью программы на ЭВМ.
2. Составлена блок-схема алгоритма расчёта среднего числа пакетов $\tilde{L}_{i,n}$, поступивших в очередь при опросе и после её опроса по выражению (3.6). По выражению (3.7) выполнены расчёты среднего числа пакетов $\bar{L}_i$, обслуженных сервером за время посещения очереди Q_i , $i = \overline{1, N}$. Среднее число пакетов L_i в очереди Q_i выполнено по выражению (3.8) [115].
3. Среднее время пребывания пакета в очереди (средняя ненормированная задержка пакета информации в очереди) определяется по выражению (3.9).
4. Для оценки ненормированных задержек в очередях мультисервисных узлов доступа составлена программа для ЭВМ на языке программирования Python, операционная система - GNU/Linux, объём программы - 78 229 Кбайт. В приложении 1 приведена Инструкция по работе с программным обеспечением «Программа для оценки задержек пакетов информации в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа» [116].

4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МУЛЬТИСЕРВИСНОГО УЗЛА ДОСТУПА НА НЕНОРМИРОВАННЫЕ ЗАДЕРЖКИ ПАКЕТОВ ИНФОРМАЦИИ В ОЧЕРЕДЯХ КОММУТАТОРОВ В СИСТЕМЕ ПОЛЛИНГА ИЗ ТРЕХ ОЧЕРЕДЕЙ

4.1. Решение систем уравнений (3.6)-(3.9) относительно переменных $\tilde{L}_{i,n}$, $\bar{L}_i$ и L_i , $i = \overline{1, N}$, в системе поллинга из трёх очередей

До решения систем уравнений (3.6)-(3.8) необходимо вычислить стационарные вероятности u_i опроса очередей Q_i , $i = \overline{1, N}$ и среднее время цикла C путём решения системы уравнений (3.1)-(3.2) [115].

При обслуживании трёх потоков информации будут задействованы три очереди: Q_1, Q_2, Q_3 . Выражение (3.7) для трёх очередей запишется следующим образом:

$$\sum_{n=i}^{i+j-1} \frac{q_{n,1}}{q_{i,j}} \tilde{L}_{i,n} = \lambda_i \left(T_{i,j} + \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N s_m u_m \right), \quad i, j = \overline{1, 3} \quad (4.1)$$

Обозначим выражение $A_i = \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N s_m u_m$. С учётом этого обозначения

выражение (4.1) примет следующий вид:

$$\sum_{n=i}^{i+j-1} \frac{q_{n,1}}{q_{i,j}} \tilde{L}_{i,n} = \lambda_i (T_{i,j} + A_i), \quad i, j = \overline{1, 3} \quad (4.2)$$

В этой системе уравнений $T_{i,j}$ и $q_{i,j}$ определяются по выражениям (3.4) и (3.5). В системе уравнений (4.2) запишем уравнения при $i=1$ с учётом диаграммы, приведённой на рисунке 3.5:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q_{1,1}}{q_{1,1}} \tilde{L}_{1,1} = \lambda_1 (T_{1,1} + A_1) \quad , \quad j=1 \\ \frac{q_{1,1}}{q_{1,2}} \tilde{L}_{1,1} + \frac{q_{2,1}}{q_{1,2}} \tilde{L}_{1,2} = \lambda_1 (T_{1,2} + A_1) \quad , \quad j=2 \\ \frac{q_{1,1}}{q_{1,3}} \tilde{L}_{1,1} + \frac{q_{2,1}}{q_{1,3}} \tilde{L}_{1,2} + \frac{q_{3,1}}{q_{1,3}} \tilde{L}_{1,3} = \lambda_1 (T_{1,3} + A_1) \quad , \quad j=3 \end{array} \right. \quad (4.3)$$

Решая систему (4.3) относительно $\tilde{L}_{1,1}$, $\tilde{L}_{1,2}$ и $\tilde{L}_{1,3}$, получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{L}_{1,1} = \lambda_1 (T_{1,1} + A_1) \\ \tilde{L}_{1,2} = \frac{\lambda_1}{q_{2,1}} [(T_{1,2} q_{1,2} - T_{1,1} q_{1,1}) + (q_{1,2} - q_{1,1}) A_1] \\ \tilde{L}_{1,3} = \frac{\lambda_1}{q_{3,1}} [(T_{1,3} q_{1,3} - T_{1,2} q_{1,2}) + (q_{1,3} - q_{1,2}) A_1] \end{array} \right. \quad (4.4)$$

В системе уравнений (4.2) запишем уравнения при $i=2$ с учётом диаграммы, приведённой на рисунке 3.5:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q_{2,1}}{q_{2,1}} \tilde{L}_{2,2} = \lambda_2 (T_{2,1} + A_2) \quad , \quad j=1 \\ \frac{q_{2,1}}{q_{2,2}} \tilde{L}_{2,2} + \frac{q_{3,1}}{q_{2,2}} \tilde{L}_{2,3} = \lambda_2 (T_{2,2} + A_2) \quad , \quad j=2 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

Решая систему (4.5) относительно $\tilde{L}_{2,2}$ и $\tilde{L}_{2,3}$, получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{L}_{2,2} = \lambda_2 (T_{2,1} + A_2) \\ \tilde{L}_{2,3} = \frac{\lambda_2}{q_{3,1}} [(T_{2,2} q_{2,2} - T_{2,1} q_{2,1}) + (q_{2,2} - q_{2,1}) A_2] \end{array} \right. \quad (4.6)$$

В системе уравнений (4.2) запишем уравнения при $i=3$ с учётом диаграммы, приведённой на рисунке 3.5:

$$\frac{q_{3,1}}{q_{3,1}} \tilde{L}_{3,3} = \lambda_3 (T_{3,1} + A_3) \quad , \quad j=1 \quad (4.7)$$

Решая систему (4.7) относительно $\tilde{L}_{2,2}$ и $\tilde{L}_{2,3}$, получаем:

$$\tilde{L}_{3,3} = \lambda_3 (T_{3,1} + A_3) \quad , \quad j=1 \quad (4.8)$$

Для нахождения в явном виде выражения для $\bar{L}_i$, решим систему уравнений (3.8):

$$\bar{L}_i = \lambda_i \frac{u_i}{\rho_i} \left(T_i + \frac{1-u-u_i}{1-\rho+\rho_i} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^N s_m u_m \right) - (1-\rho_i) \frac{u_i}{\rho_i} \sum_{n=1}^3 q_{n,1} \tilde{L}_{i,n}, \quad i = \overline{1,3}$$

Распишем в явном виде данное уравнение для $i = \overline{1,3}$:

$$\begin{cases} \bar{L}_1 = \frac{u_1}{\rho_1} \left[\lambda_1 (T_1 + A_1) - (1-\rho_1) \sum_{n=1}^3 q_{n,1} \tilde{L}_{1,n} \right], & i = 1 \\ \bar{L}_2 = \frac{u_2}{\rho_2} \left[\lambda_2 (T_2 + A_2) - (1-\rho_2) \sum_{n=1}^3 q_{n,1} \tilde{L}_{2,n} \right], & i = 2 \\ \bar{L}_3 = \frac{u_3}{\rho_3} \left[\lambda_3 (T_3 + A_3) - (1-\rho_3) \sum_{n=1}^3 q_{n,1} \tilde{L}_{3,n} \right], & i = 3 \end{cases} \quad (4.9)$$

Решая систему (4.5) относительно $\bar{L}_1$, $\bar{L}_2$ и $\bar{L}_3$, подставляя значения $\tilde{L}_{i,n}$, получаем:

$$\begin{cases} \bar{L}_1 = \lambda_1 \frac{u_1}{\rho_1} \left[(T_1 - (1-\rho_1)T_{1,3}q_{1,3}) + (1 - (1-\rho_1)q_{1,3})A_1 \right], & i = 1 \\ \bar{L}_2 = \lambda_2 \frac{u_2}{\rho_2} \left[(T_2 - (1-\rho_2)T_{2,2}q_{2,2}) + (1 - (1-\rho_2)q_{2,2})A_2 \right], & i = 2 \\ \bar{L}_3 = \lambda_3 \frac{u_3}{\rho_3} \left[(T_3 - (1-\rho_3)T_{3,1}q_{3,1}) + (1 - (1-\rho_3)q_{3,1})A_3 \right], & i = 3 \end{cases} \quad (4.10)$$

Далее аналогичным прямым подставлением получается значение и для L_1 .

В рассматриваемой системе поллинга из трёх очередей при шлюзовой дисциплине обслуживания для нахождения переменных $\tilde{L}_{i,j}$, $i, j = \overline{1,3}$, необходимо решить 6 уравнений. Для нахождения переменных $\bar{L}_i$, $i = \overline{1,3}$, необходимо решить 3 уравнения. Для нахождения переменных $\bar{L}_i$, $i = \overline{1,3}$, необходимо решить ещё 3 уравнения. Всего необходимо решить 12 уравнений.

В общем случае, при числе очередей равном N число уравнений определяется по выражению $N(N+1)$.

4.2. Анализ результатов вычисления на ЭВМ ненормированных задержек пакетов информации при изменении параметров системы поллинга из трёх очередей

Исходные данные системы поллинга из трёх очередей.

Анализ проводился для следующих параметров системы поллинга:

Производительность сервера: 12,8 Гбит/с.

Голосовой трафик: ВКС: ПД:

Число пользователей: 10 000. Тип кодека: *H.264*. Число скачиваний данных: 10.

Число удельных вызовов: 3. Длительность ВКС: 45 мин. Скорость скачивания: 10 Мбит/с.

Тип кодека: *G.711*. Число ВКС: 3. Длительность скачивания: 5 мин.

При вычислениях и построении зависимостей от какой-либо одной величины, остальные параметры оставались неизменными.

Для анализа ненормированных задержек пакетов информации при изменении параметров системы поллинга из трёх очередей была вычислена и выведена на печать 21 зависимость. Ниже приведено 9 наиболее характерных зависимостей.

На рисунках 4.1, 4.2 и 4.3 показаны переходные процессы изменения ненормированных задержек пакетов информации в очередях при изменении производительности сервера от 250 Мбит/с до 10 Тбит/с для голосового трафика, видеоконференцсвязи, передачи данных соответственно.

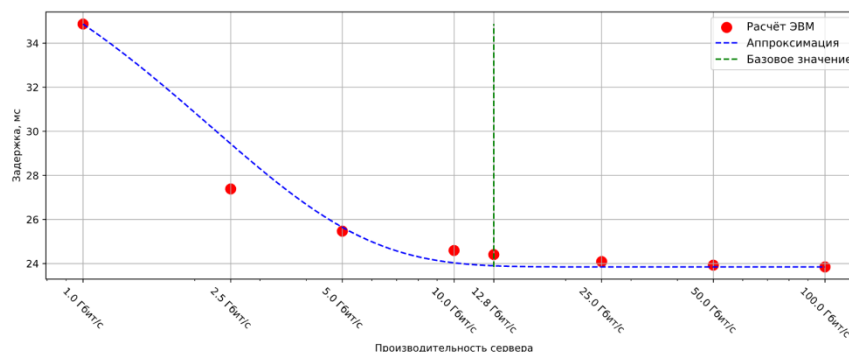


Рисунок 4.1 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации в очереди голосового трафика от производительности сервера

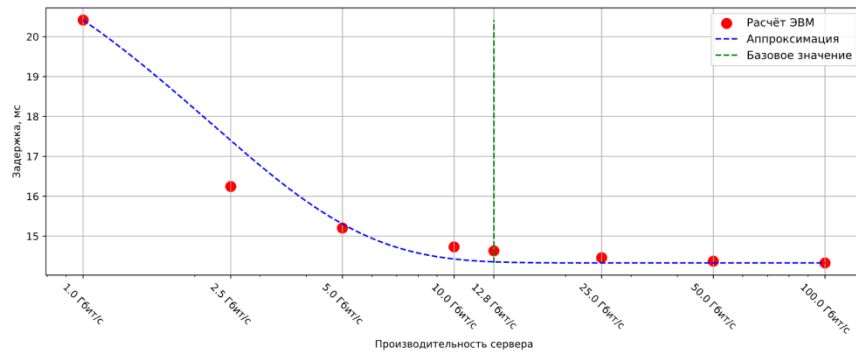


Рисунок 4.2 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации в очереди видеоконференцсвязи от производительности сервера

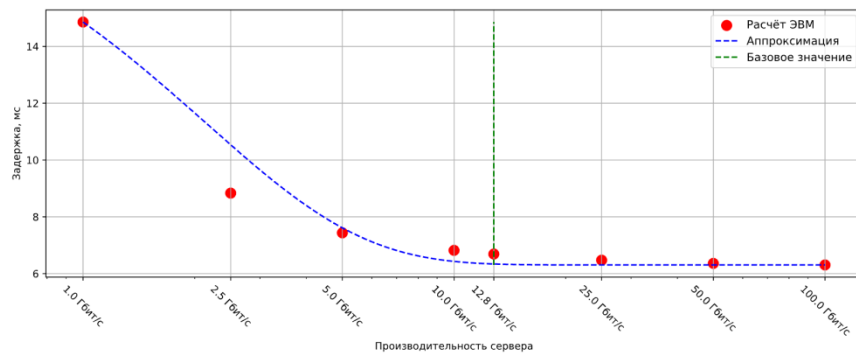


Рисунок 4.3 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации в очереди передачи данных от производительности сервера

Аппроксимирующие зависимости, полученные методом наименьших квадратов:

Рисунок 4.1: $W_{\text{гол}}(V_{\text{сервер}}) \approx 17.332 e^{-0.453V_{\text{сервер}}} + 23.846 \text{ мс};$

Рисунок 4.2: $W_{\text{ВКС}}(V_{\text{сервер}}) \approx 9.617 e^{-0.457V_{\text{сервер}}} + 14.328 \text{ мс};$

Рисунок 4.3: $W_{\text{ПД}}(V_{\text{сервер}}) \approx 13.682 e^{-0.470V_{\text{сервер}}} + 6.305 \text{ мс}.$

Ненормированные задержки пакетов информации в очередях пакетного коммутатора существенным образом зависят от производительности управляющего сервера. При проектировании мультисервисных узлов доступа для обеспечения установившихся значений ненормированных задержек пакетов информации в очередях при выборе производительности сервера рекомендуется использовать разработанную в диссертации программу.

На рисунках 4.4, 4.5 и 4.6 приведены переходные процессы изменения ненормированных задержек пакетов информации в трёх очередях от числа

пользователей голосового трафика. При значительном увеличении числа пользователей голосового трафика значения ненормированных задержек пакетов информации голосового трафика возрастают.

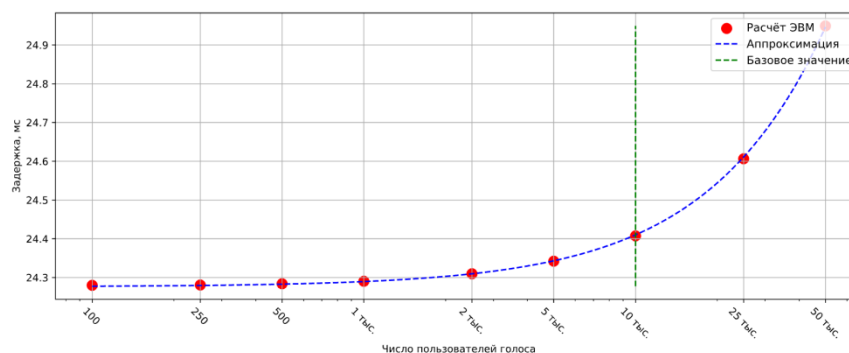


Рисунок 4.4 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации в очереди голосового трафика от числа пользователей голосового трафика

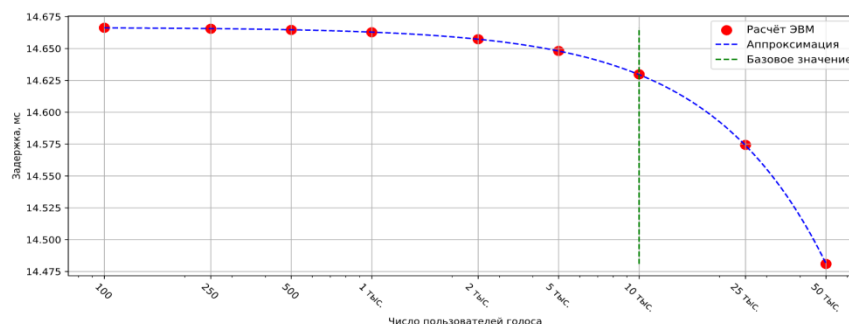


Рисунок 4.5 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации в очереди видеоконференцсвязи от числа пользователей голосового трафика

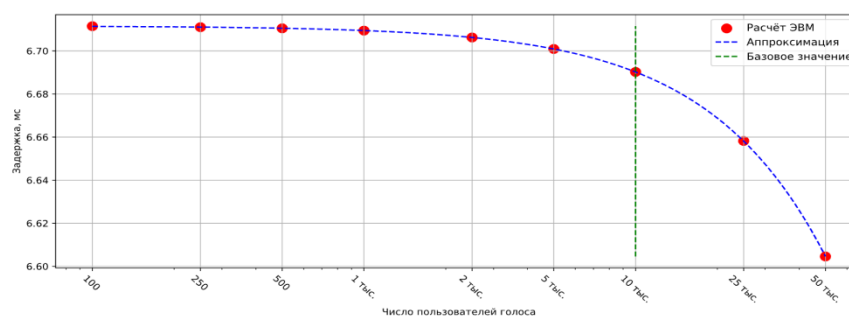


Рисунок 4.6 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации в очереди передачи данных от числа пользователей голосового трафика

Аппроксимирующие зависимости, полученные методом наименьших квадратов:

Рисунок 4.4: $W_{\text{гол}}(n_{\text{гол}}) \approx 13.399 n_{\text{гол}} + 24.276$ мс;

Рисунок 4.5: $W_{\text{ВКС}}(n_{\text{гол}}) \approx -3.708 n_{\text{гол}} + 14.667$ мс;

Рисунок 4.6: $W_{\text{ПД}}(n_{\text{гол}}) \approx -2.139 n_{\text{гол}} + 6.712$ мс.

Так как голосовой трафик имеет высший приоритет обслуживания, ненормированные задержки пакетов информации видеоконференцсвязи и передачи данных снижаются.

На рисунках 4.7, 4.8 и 4.9 приведены переходные процессы изменения ненормированных задержек пакетов информации в трёх очередях от скорости скачивания передачи данных.

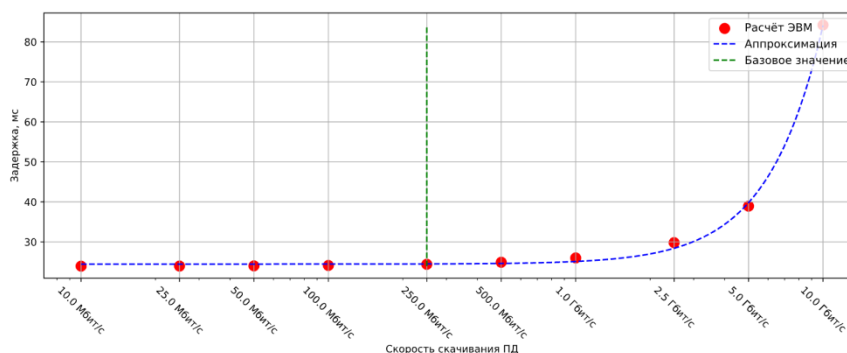


Рисунок 4.7 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации в голосовой очереди от скорости скачивания передачи данных

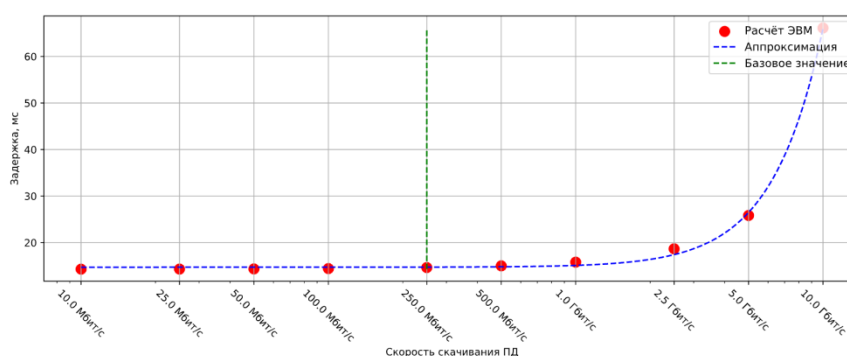


Рисунок 4.8 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации видеоконференцсвязи от скорости скачивания передачи данных

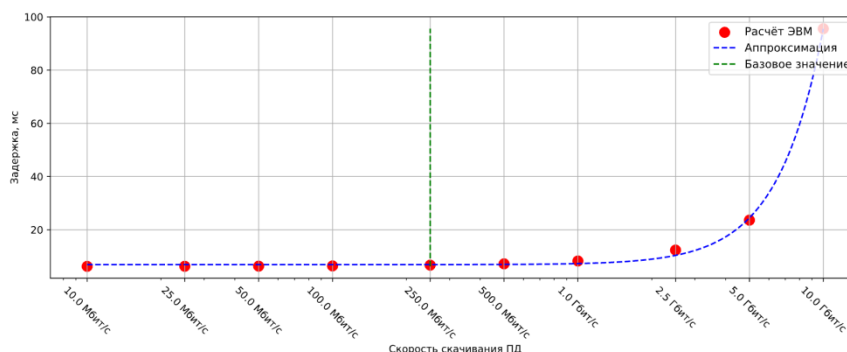


Рисунок 4.9 — Зависимость ненормированных задержек пакетов информации передачи данных от скорости скачивания передачи данных

Аппроксимирующие зависимости, полученные методом наименьших квадратов:

Рисунок 4.7: $W_{\text{гол}}(V_{\text{ПД}}) \approx 0.658V_{\text{ПД}}^{1.975} + 24.448$ мс;

Рисунок 4.8: $W_{\text{ВКС}}(V_{\text{ПД}}) \approx 0.385V_{\text{ПД}}^{2.125} + 14.708$ мс;

Рисунок 4.9: $W_{\text{ПД}}(V_{\text{ПД}}) \approx 0.413V_{\text{ПД}}^{2.331} + 6.687$ мс.

При приближении скорости передачи данных к производительности сервера во всех трёх очередях задержки пакетов информации, как и следовало ожидать, резко возрастают.

Из других исследованных с помощью ЭВМ зависимостей отметим следующие.

1. Зависимости ненормированных задержек пакетов информации от изменения удельного числа голосовых вызовов (числа вызовов от одного пользователя в ЧНН) от 1 до 5. Характер этих зависимостей повторяет зависимости, приведённые на рисунках 4.4, 4.5 и 4.6, так как рост удельного числа вызовов, при прочих равных условиях, приводит к росту суммарного числа вызовов.

2. Зависимости ненормированных задержек пакетов информации от изменения числа скачиваний передачи данных (ПД) повторяют характер изменения зависимостей от скорости скачиваний передачи данных, приведённых на рисунках 4.7, 4.8 и 4.9.

3. Зависимости ненормированных задержек пакетов информации от длительности сеансов видеоконференцсвязи (ВКС): с ростом длительности сеансов ВКС ненормированные задержки голосовых пакетов линейно возрастают, а задержки пакетов информации ВКС и ПД линейно уменьшаются.

В рассматриваемой системе поллинга из трёх очередей для принятых исходных данных в стационарном режиме функционирования получены следующие средние значения ненормированных задержек пакетов информации в очередях:

- для пакетов информации голосового трафика порядка $W_{\text{гол}} \approx 24$ мс;
- для пакетов информации видеоконференцсвязи порядка $W_{\text{ВКС}} \approx 14$ мс;
- для пакетов информации передачи данных порядка $W_{\text{ПД}} \approx 6$ мс.

Выводы по разделу 4

1. В системе поллинга при шлюзовой дисциплине обслуживания очередей число уравнений в системах (3.6) - (3.8) растёт как $N(N+1)$ с ростом числа очередей N .
2. При принятых для исследования исходных данных в системе поллинга из трёх очередей с ростом производительности сервера ненормированные задержки пакетов информации в очередях голосового трафика и видеоконференцсвязи снижаются, а в очереди передачи данных - возрастают до установившихся значений при росте производительности сервера до 50 Гбит/с.
3. При проектировании мультисервисных узлов доступа для обеспечения установившихся значений ненормированных задержек пакетов информации в очередях при выборе производительности сервера рекомендуется использовать разработанную в диссертации программу.
4. В исследуемой системе поллинга при росте числа пользователей голосового трафика ненормированные задержки пакетов информации в очереди

голосового трафика возрастают, а в очередях видеоконференцсвязи и передачи данных - снижаются.

5. В исследуемой системе поллинга при значительном увеличении скорости скачивания трафика передачи данных ненормированные задержки пакетов информации во всех трёх очередях возрастают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первом разделе диссертации выполнен анализ принципов и способов построения телекоммуникационных сетей доступа в соответствии с тремя концепциями МСЭ -Т: «Сети следующего поколения - NGN»; «Будущие сети - FN»; «Сети - 2030 - Net-2030». Перевод сетей связи с технологии коммутации каналов на технологию коммутации пакетов во многих источниках характеризуется как смена парадигмы развития телекоммуникаций.

При переходе к сетям с коммутации пакетов рекомендуется придерживаться принципов «неразрушающего» перехода и «обратной» совместимости - способность новой версии системы корректно обрабатывать функции предыдущих версий после обновления.

В МСЭ-Т рекомендуются к применению перспективные технологии, особое место среди них занимает технология виртуализации. Так, в нашей стране вместо дорогостоящей IMS находит применение виртуальная vIMS.

В трёх концепциях МСЭ-Т с учётом внедрения перспективных инфокоммуникационных технологий требования к пиковым скоростям сетей доступа изменялись последовательно: 100 Мбит/с - 10 Гбит/с - 100 Гбит/с; допустимые задержки пакетов соответственно менее 100 мс - 30 мс - 5мс [115, 116].

Во втором разделе диссертации разработана функциональная модель узла доступа мультисервисной сети связи. Анализ функций кодирования информации в шлюзах узла доступа позволил рекомендовать типы кодеков для сжатия изображений, аудио, видео.

В технологии Ethernet с помощью стандарта IEEE 802.1Q образуются виртуальные локальные сети VLAN. Для сообщений передачи данных, голосовых, видеоконференцсвязи и управления выделяются отдельные VLAN. Каждой VLAN назначается класс приоритета по обслуживанию QoS. Обычно высший приоритет обслуживания назначается VLAN с голосовым трафиком.

К данным каждого кадра добавляется идентификатор для указания VLAN, к которой принадлежит кадр. Идентификатор IEEE 802.1Q позволяет пронумеровать 4094 VLAN. Дополнение 802.1ad к стандарту IEEE 802.1Q позволяет пронумеровать $4094 \times 4094 = 16\,760\,836$ VLAN. Приведён состав форматов кадров при реализации стандартов IEEE 802.3, IEEE 802.1Q, IEEE 802.1ad.

Значения CoS (Class of Service) во входящих кадрах, передаваемых по интерфейсу L2 на втором канальном уровне, должны быть доверенными. Режим доверия устанавливается с помощью специальной команды «mls qos trust cos» - доверять меткам CoS. Значения DSCP (DiffServ Code Point) во входящих пакетах, передаваемых по интерфейсу L3 на третьем сетевом уровне, также являются доверенными. Режим доверия (trust mode) ограничивает взаимодействие сторонних приложений – блокирует любое стороннее программное обеспечение.

В системе поллинга опрос очередей является циклическим. Для предотвращения монопольного захвата всего ресурса сервера при обслуживании одной очереди принята шлюзовая дисциплина обслуживания, при которой сервер обслуживает лишь те заявки, которые находились в очереди в момент начала её опроса. Заявки, поступившие в очередь после опроса, обслуживаются в следующем цикле.

В третьем разделе диссертации анализ интенсивностей, поступающих в MSAN потоков сообщений, показал, что интенсивность голосовых сообщений обычно в сотни и даже в тысячи раз может превышать интенсивности других потоков. В этих условиях для предотвращения монопольного захвата сервера очередью с голосовыми сообщениями рекомендовано использовать шлюзовую дисциплину обслуживания. При этой дисциплине все заявки, ожидающие в очереди в момент её опроса, будут обслужены в текущем цикле. Заявки, которые поступают в очередь в период её обслуживания сервером, получают обслуживание лишь в следующем цикле.

Из анализа литературы по стохастическому поллингу следует, что значения среднего времени цикла C и стационарных вероятностей опроса очередей u_i

связывает система нелинейных уравнений, которая решается итерационным методом простых итераций. Составлена блок-схема алгоритма, который реализован с помощью программы на ЭВМ. Исследовано влияние значений исходных данных на результаты расчётов.

Составлена блок-схема алгоритма расчёта среднего числа заявок $\tilde{L}_{i,j}$, поступивших в очередь при опросе и после её опроса по выражению (3.6). По выражению (3.7) выполнены расчёты среднего числа заявок $\bar{L}_i$, обслуженных сервером за время посещения очереди Q_i . Среднее число заявок L_i в очереди Q_i выполнено по выражению (3.8).

Среднее время пребывания заявки в очереди (средняя ненормированная задержка пакета в очереди) определялось по теореме Дж. Литтла по выражению (3.9).

Для оценки задержек пакетов информации в очередях мультисервисных узлов доступа составлена программа для ЭВМ на языке программирования Python, операционная система - GNU/Linux, объём программы - 78 229 Кбайт [115, 116].

В четвёртом разделе диссертации проведено исследование параметров трафика и мультисервисного узла доступа на ненормированные задержки пакетов информации в очередях коммутаторов в системе поллинга из трёх очередей. Выполнено решение систем уравнений (3.7), (3.8) и (3.9) относительно переменных $\tilde{L}_{i,j}$, $i, j = \overline{1,3}$, $\bar{L}_i$, $i = \overline{1,3}$ и L_i , $i = \overline{1,3}$ в системе поллинга из $N = 3$ очередей. Число уравнений в системах (3.7) - (3.9) растёт как $N(N+1)$ с ростом числа очередей N .

Анализ результатов вычислений на ЭВМ ненормированных задержек пакетов информации при изменении параметров системы поллинга из трёх очередей:

- при принятых для исследования исходных данных в системе поллинга из трёх очередей с ростом производительности сервера ненормированные

задержки пакетов информации в очередях голосового трафика и видеоконференцсвязи снижались, а в очереди передачи данных - возрастали до установившихся значений при росте производительности сервера до 50 Гбит/с. Принятое в исходных данных значение производительности сервера 12,8 Гбит/с не обеспечивает установившийся режим изменения задержек при росте производительности сервера. При проектировании мультисервисного узла доступа при выборе производительности сервера рекомендуется использовать разработанную в диссертации программу;

- в исследуемой системе поллинга при росте числа пользователей голосового трафика ненормированные задержки пакетов информации в очереди голосового трафика возрастают, а в очередях видеоконференцсвязи и передачи данных - снижаются;
- в исследуемой системе поллинга при значительном увеличении скорости скачивания передачи данных ненормированные задержки пакетов информации во всех трёх очередях возрастают.

В приложении А приведены акты о практической реализации результатов диссертационной работы.

В приложении Б приведено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЛ	—	абонентская линия
АДИКМ	—	адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция
АТС	—	автоматическая телефонная станция
ВАК	—	Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации
ВКС	—	видеоконференцсвязь
ГОСТ	—	государственный стандарт
ИКМ	—	импульсно-кодовая модуляция
ЛВС	—	локальная вычислительная сеть
МСЭ-Т	—	Международный союз электросвязи - сектор стандартизации электросвязи
ОКС №7	—	общеканальная система сигнализации №7
ПАО	—	публичное акционерное общество
ПД	—	передача данных
СОРМ	—	система обеспечения розыскных мероприятий
СПС	—	сеть подвижной связи
ЭМВОС	—	эталонная модель взаимосвязи открытых систем
AAA	—	аутентификация, авторизация и учёт (Authentication, Authorization and Accounting)
AAC	—	патентованный формат сжатия аудио (Advanced Audio Coding)
AF	—	класс обслуживания, обеспечивающий гарантированную доставку (Assured Forwarding)
AGW	—	шлюз доступа (Access Gateway)
AI	—	искусственный интеллект (Artificial Intelligence)
AN	—	сеть доступа (Access Network)
AS	—	сервер приложений (Application Server)
AV1	—	открытый стандарт сжатия видео, передаваемого по Интернет -

альтернатива HEVC (H. 265)

AVC	— лицензируемый стандарт сжатия видео (Advanced Video Coding)
BRI	— стандартный базовый интерфейс с пропускной способностью 144 кбит/с (Basic Rate Interface)
Bzip2	— бесплатная утилита командной строки для сжатия данных
CDN	— предоставление пользователю контента как пакета услуг (Content Delivery Network)
CoS	— класс услуг, 3-битное поле для маркировки кадров в соответствии со стандартом IEEE 802.1p (Class of Service)
CS	— модель сохранения обратной совместимости с IP-Precedence (метод, используемый в IP-заголовках для приоритизации трафика) (Class Selector)
C-Tag	— тег сети пользователя
DONA	— дата-ориентированная сетевая архитектура (Data-Oriented Network Architecture)
DECT	— цифровая беспроводная связь (Digital Enhanced Cordless Telecommunication)
Diameter	— это протокол аутентификации, авторизации и учёта (AAA)
DiffServ	— принцип дифференцированного обслуживания (Differentiated_services)
DNS	— система доменных имён (Domain Name System)
DSCP	— кодовая точка дифференцированных услуг (Differentiated Services Code Point)
DWDM	— (Dense Wavelength Division Multiplexing)
E1	— стандарт цифровой передачи данных пропускной способностью 2048 кбит/с
EDTV	— Телевидение повышенной чёткости (Enhanced-Definition Television)
EF	— модель, обеспечивающая экстренную пересылку в сетях

(Expedited Forwarding)

eFBB	—	улучшенная фиксированная широкополосная связь (Enhanced Fixed Broadband)
EPON	—	пассивная оптическая сеть Ethernet (Ethernet Passive Optical Network)
ETSI	—	Европейский институт телекоммуникационных стандартов (European Telecommunications Standards Institute)
FEC	—	класс эквивалентности пересылки (Forwarding Equivalence Class)
FG	—	фокус-группа (Focus Group)
FIFO	—	«первым пришёл — первым ушёл» (First In, First Out)
FFC	—	«Оптоволокно до всего и повсюду» (Full-Fiber Connection)
FMC	—	конвергенция фиксированной и мобильной связи (Fixed Mobile Convergence)
FN	—	Концепция будущих сетей (Future Networks)
FTTH	—	оптика до дома (Fiber to The Home)
3GPP	—	партнерский проект развития связи 3-го поколения (3rd Generation Partnership Project)
GE	—	Ethernet со скоростью 1 Гбит/с (Gigabit Ethernet)
GIF	—	это формат растровой графики для создания анимированных изображений (Graphics Interchange Format)
GPRS	—	пакетная радиосвязь общего пользования (General Packet Radio Service)
GRE	—	гарантированная надёжность доставки (Guaranteed Reliable Experience)
GZIP	—	утилита сжатия и восстановления файлов (сокращение от GNU Zip)
HEVC	—	высокоэффективное кодирование видеоизображений (High Efficiency Video coding)

HLR	— домашний регистр (Home Location Register)
HSS	— сервер абонентских данных (Home Subscriber Server)
HTTP	— протокол передачи гипертекста (Hyper Text Transfer Protocol)
I-CSCF	— функция запроса (Interrogating CSCF)
ID	— идентификатор (Identifier)
IEEE	— Институт инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IETF	— Инженерный совет Интернета (Internet Engineering Task Force)
iLBC	— свободный от лицензионных отчислений кодек для голосовой связи через интернет (internet Low Bitrate Codec)
IMS IP	— IP-мультимедийная платформа (подсистема передачи мультимедийных сообщений) (Multimedia Subsystem IP)
IMS Core	— ядро vIMS
IntPri	— регистр приоритета прерываний (обработка пакета внутри коммутатора)
IoT	— Интернет вещей (Internet of Things)
IP/MPLS	— интернет протокол/многопротокольная коммутация по меткам (Internet Protocol/Multi-Protocol Label Switching)
Ipssec	— набор протоколов для обеспечения защиты данных (IP Security)
IPTV	— IP-телевидение (интерактивное телевидение) (IP Television)
IPDV	— изменение (джиттер)задержки пакета (IP Packet Delay Variation)
IPER	— процент ошибочных пакетов (IP Packet Error Ratio)
IPLR	— вероятность потери пакета (IP Packet Loss Ratio)
IPRR	— процент переупорядочивания пакетов (IP Packet Reordering Ratio)
IPTD	— задержка передачи пакета (IP Packet Transfer Delay)
IPv4	— четвёртая версия интернет-протокола (IP) (Internet Protocol version 4)
IPv6	— разработанная в IETF вместо IPv4 (Internet Protocol version 6)

ISDN	— цифровая сеть с интеграцией служб (Integrated Services Digital Network)
ISO	— Международная организация по стандартизации (International Organization for Standardization)
ITU	— Международный союз электросвязи (International Telecommunication Union)
JPEG	— один из растровых графических форматов (Joint Photographic Experts Group)
LAN	— локальная вычислительная сеть (Local Area Network)
LINP	— логически изолированная часть сети (Logically Isolated Network Partition)
LLQ	— организация очередей с низкой задержкой (Low Latency Queuing)
LSP	— путь с коммутацией по меткам. (Label Switched Path)
LSR	— маршрутизатор с коммутацией по меткам (Label Switching Router)
LZW	— это универсальный алгоритм сжатия данных без потерь (Lempel-Ziv-Welch)
M2M	— межмашинное взаимодействие (Machine-to-Machine)
MAC	— управление доступом к среде передачи Ethernet (Media Access Control)
MEC	— граничные вычисления с множественным доступом (Multi-access Edge Computing)
MEGACO	— протокол управления шлюзами (H.248/MEGACO) (Media Gateway Control)
MEF	— Международный форум Ethernet (Metro Ethernet Forum)
MG/MGW	— транспортный шлюз (Media Gateway)
MGC	— контроллер транспортных шлюзов (Media Gateway Controller)
MGCF	— функция управления медиашлюзами (Media Gateways Control)

	Function)
MGCP	— протокол управления медиашлюзами (Media Gateway Control Protocol)
MIMO	— радиотехнология, использующая множество антенн на передаче и на приёме (Multiple Input Multiple Output)
ML	— машинное обучение (Machine Learning)
MP3	— аудиоформат, разработанный MPEG, в 2017 г. срок действия патентов истёк
MPEG-4	— кодирование интерактивного мультимедиа (Moving Picture Experts Group)
MPLS	— многопротокольная коммутация по меткам (Multiprotocol Label Switching)
MSAN	— мультисервисный узел доступа (Multi-Service Access Node)
Net-2030	— концепция сети 2030
NFV	— виртуализация сетевых функций (Network Functions Virtualization)
NGN	— Концепция сетей следующего поколения (Next Generation Networks)
NG SDH	— новое поколение SDH для передачи пакетного трафика (Next Generation Synchronous Digital Hierarchy)
OLT	— оптический линейный терминал (Optical Line Terminal)
ONT	— оптический сетевой терминал (Optical Network Terminal)
Opus	— аудиокодек для сжатия с потерями и для применения в приложениях реального времени в Интернете
OSI	— семиуровневая модель взаимодействия открытых систем (Open Systems Interconnection)
OSS/BSS	— система поддержки операций/ система поддержки бизнеса (Operation Support System / Business Support System)
OTN-OTH	— оптическая транспортная сеть - оптическая транспортная

иерархия (Optical Transport Network – Optical Transport Hierarchy)

P-CSCF	— функция прокси-сервера (Proxy CSCF)
P2P	— «точка-точка» (Point-to-Point)
P2MP	— «точка - много точек» (Point to Multi Point)
PNF	— физические сетевые функции (Physical Network Functions)
PNG	— растровый формат хранения цифровых изображений (Portable Network Graphics)
PoE	— питание через кабели Ethernet (Power over Ethernet)
PON	— пассивные оптические сети (Passive optical network)
PRI	— интерфейс с первичной скоростью (Primary Rate Interface)
PSTN	— телефонная сеть связи общего пользования (Public Switched Telephone Network)
QoS	— качество обслуживания (Quality of Service)
Q-in-Q	— технология создания нескольких изолированных сегментов внутри одной VLAN (Q-туннелирование)
RAGW	— резидентный шлюз доступа (Resident Access Gateway)
RTP	— протокол передачи в реальном времени (Real-time Transport Protocol)
SDH	— синхронная цифровая иерархия (Synchronous Digital Hierarchy)
SDN	— программно-конфигурируемая сеть (Software Defined Networking)
SIGTRAN	— группа протоколов для взаимодействия ТфОП и VoIP (от Signaling Transport)
SIP	— протокол инициирования сеансов связи (Session Initiation Protocol)
S-CSCF	— функция обслуживания (Serving CSCF)
SMS	— служба коротких сообщений (Short Message Service)
SON	— самоорганизующаяся сеть (Self-Organization Network)

SP	— строгий приоритет очереди (Strict Priority queuing)
CoS	— информация о классификации на втором уровне модели OS CoS занимает 3 бита и может принимать значения от 0 до 7. (Class of Service)
S-Tag	— тег сети провайдера (Service Tag)
SUN	— умная всепроникающая сеть (Smart Ubiquitous Network)
SyncE	— синхронный Ethernet (Synchronous Ethernet)
TDM	— Мультиплексирование с разделением по времени (Time Division Multiplexing)
TCP/IP	— это набор сетевых протоколов в основе интернета и большинства локальных сетей (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)
TG	— транзитный (транкинговый) шлюз (Trunk Gateway)
ToS	— Тип обслуживания (Type of Service)
TTL	— время жизни пакета (Time to Live)
UDP	— протокол пользовательских дейтаграмм (User Datagram Protocol)
UE	— пользовательское оборудование (User Equipment)
UNI	— интерфейс пользователь-сеть (User-to-Network Interface)
UNI-UNI	— канал передачи данных. Требования к техническим характеристикам UNI-UNI описаны в Рекомендации МСЭ-T Y.1541.
VID	— идентификатор VLAN (VLAN Identifier)
vIMS	— обеспечивает работу приложений IMS в виртуализированной среде (virtual IP-multimedia subsystem)
vIMS-Core	— уровень ядра в технологии vIMS (virtual IP Multimedia Subsystem)
vIMS-Edge	— уровень присоединения (доступа) в архитектуре виртуальной подсистемы vIMS
VLAN	— виртуальная локальная сеть (Virtual Local Area Network)

VLV&TIC	— очень большой объем передаваемых данных и крошечные мгновенные сообщения (Very Large Volume & Tiny Instant Communications)
VLR	— визитный регистр местоположения (Visitors Location Register)
VNF	— виртуальные сетевые функции (Virtual Network Functions)
VoD	— видео по запросу (Video on Demand)
VoIP	— голос по IP (Voice over IP)
Vorbis	— свободный формат сжатия звука с потерями (Ogg Vorbis)
VPN	— виртуальная частная сеть (Virtual Private Network)
WAN	— Глобальная вычислительная сеть (wide area network)
WDM	— мультиплексирование с разделением по длине волны (Wavelength-division multiplexing)
WCDMA	— широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов (Wideband Code Division Multiple Access)
WRED	— алгоритм предотвращения перегрузки, отбрасывает некоторый процент пакетов до заполнения очередей (Weighted Random Early Detection)
WRR	— взвешенный циклический перебор (Weighted Round Robin)
WSN	— беспроводная сенсорная сеть (Wireless Sensor Network)
xDSL	— семейство технологий цифровых абонентских линий (Digital Subscriber Line)

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Сервер приложений: программная платформа для построения приложений.

Сеть распределения контента: распределённая сеть серверов, предназначенная для ускоренной доставки контента пользователям.

Дата-ориентированная сетевая архитектура: архитектура, в которой клиент запрашивает данные по их имени — плоской самосертифицирующей метке, а не по адресу владельца.

Дифференцированное обслуживание: принцип обеспечения качества обслуживания в сетях с помощью дифференциации трафика и назначения приоритетов.

Система доменных имён: система преобразования доменных имён в адреса сетевых устройств.

Цифровое телевидение повышенной чёткости: система передачи телевизионных сигналов с построчным разложением, числом активных строк в кадре 720 и числом элементов в строке 1280.

Класс эквивалентности пересылки: группа пакетов с одинаковыми требованиями к передаче.

Конвергенция фиксированной и мобильной связи: объединение фиксированной и мобильной связи, позволяющее организовать единую сеть офисных и мобильных телефонных аппаратов с общим планом короткой нумерации.

Сервер абонентских данных: централизованный сервер, хранящий информацию об абонентах сети связи.

Протокол передачи гипертекста: протокол передачи текста, содержащего ссылки на изображения, видео, страницы и документы.

Мультимедийная подсистема: подсистема передачи мультимедийных сообщений на основе интернет-протокола.

Интернет вещей: сеть устройств, обменивающихся данными друг с другом без непосредственного участия человека.

Технология передачи пакетов с использованием многопротокольной коммутации по меткам: технология, позволяющая создавать виртуальные каналы между узлами сети и инкапсулировать различные протоколы передачи данных.

Телевидение по интернет-протоколу: цифровое телевидение на основе пакетных сетей, предоставляющее возможности управления контентом и его просмотром.

Вариация задержки пакетов: разность между задержками передачи в одном направлении для выбранных пакетов.

Коэффициент ошибок пакетов: отношение числа пакетов, принятых с ошибками, к общему числу принятых пакетов.

Коэффициент потери пакетов: отношение общего числа потерянных пакетов к общему числу переданных пакетов.

Коэффициент переупорядочивания пакетов: показатель нарушения порядка поступления пакетов. пакет считается переупорядоченным, если его порядковый номер меньше порядкового номера предыдущего принятого пакета.

Задержка передачи пакета: время от момента отправки пакета до его поступления в пункт назначения.

Международная организация по стандартизации: организация, объединяющая национальные органы по стандартизации и разрабатывающая международные стандарты на основе консенсуса.

Формат JPEG: растровый графический формат, используемый для хранения изображений и фотографий с высокой степенью сжатия.

Путь с коммутацией по меткам: однонаправленный путь передачи данных от входного до выходного маршрутизатора.

Маршрутизатор с коммутацией по меткам: маршрутизатор, осуществляющий пересылку пакетов с использованием меток.

Управление доступом к среде передачи: механизм управления доступом к физической среде передачи и обработки кадров данных в локальных сетях.

Многопротокольная коммутация по меткам: технология, использующая метки вместо адресов сетевого уровня для передачи данных между узлами сети.

Виртуализация сетевых функций: реализация функций сетевых узлов в виде программных компонентов, которые могут объединяться для предоставления услуг.

Эталонная модель взаимодействия открытых систем: семиуровневая модель, описывающая взаимодействие устройств при обмене данными в сетях.

Питание через Ethernet: технология передачи электрической энергии через стандартную витую пару в сети Ethernet.

Качество обслуживания: совокупность характеристик услуги электросвязи, определяющих её способность удовлетворять установленные и предполагаемые потребности пользователя.

Двойное тегирование виртуальных локальных сетей: технология добавления второго тега к заголовку кадра Ethernet.

Резидентный шлюз доступа: устройство, предназначенное для непосредственного подключения абонентских линий к мультисервисной сети.

Протокол инициирования сеансов связи: протокол сигнализации, предназначенный для установления, изменения и завершения мультимедийных сеансов связи.

Самоорганизующаяся сеть: сеть, использующая механизмы автоматизации управления мобильным радиодоступом.

Умная всепроникающая сеть: пакетная сеть, обеспечивающая предоставление услуг связи людям и устройствам.

Синхронный Ethernet: технология передачи тактовой синхронизации на физическом уровне Ethernet.

Тип обслуживания: поле заголовка пакета интернет-протокола четвёртой версии, первоначально предназначенное для указания требуемых характеристик обслуживания. в современной интерпретации соответствующие восемь бит используются для обозначения дифференцированного обслуживания и явного уведомления о перегрузке.

Время жизни пакета: параметр, ограничивающий число переходов пакета между сетевыми узлами до его удаления.

Пользовательское оборудование: устройство, подключаемое к беспроводной сети для доступа к услугам и приложениям.

Интерфейс «пользователь — сеть»: интерфейс соединения сетевого оборудования пользователя с сетью поставщика услуг.

Виртуальная мультимедийная подсистема: программная реализация архитектуры мультимедийной подсистемы в виртуализированной среде.

Виртуальные сетевые функции: программные реализации сетевых функций, выполняемые на стандартных серверах.

Технология Wi-Fi: технология беспроводной передачи цифровых данных по радиоканалам.

Взвешенный циклический перебор: алгоритм циклического распределения обслуживания между объектами в соответствии с назначенными им весами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендация МСЭ-Т Y.2001 (12/2004). Сети последующих поколений. Структура и функциональные модели архитектуры. Общий обзор СПП / Международный союз электросвязи. — Женева: МСЭ, 2004. — 18 с.
2. Сети следующего поколения NGN / под ред. А. В. Рослякова. — Москва: Эко-Трендз, 2009. — 424 с. — (Библиотека «Интеллект Телеком»). — ISBN 978-5-88405-082-2.
3. Гольдштейн, А. Б. Транспортные сети IP/MPLS. Технология и протоколы: учебное пособие / А. Б. Гольдштейн, А. В. Никитин, А. А. Шкрыль; СПбГУТ. — Санкт-Петербург, 2016. — 80 с. — ISBN 978-5-89160-129-1.
4. 3GPP IMS Specifications: [Электронный ресурс]. — URL: <https://portal.3gpp.org/Specifications.aspx?q=1&title=IMS&releases=all&draft=True&underCC=True&withACC=False&withBCC=False&numberNYA=False> (дата обращения: 26.09.2026).
5. Атцик, А. А. Протокол Megaco/H.248: справочник по телекоммуникационным протоколам / А. А. Атцик, А. Б. Гольдштейн, Б. С. Гольдштейн. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2009. — 816 с. — (Телекоммуникационные протоколы). — ISBN 978-5-9775-0331-0.
6. Гольдштейн, Б. С. Протокол SIP: справочник по телекоммуникационным протоколам / Б. С. Гольдштейн, А. А. Зарубин, В. В. Саморезов. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. — 456 с. — (Телекоммуникационные протоколы ВСС РФ). — ISBN 5-8206-0123-8.
7. 3GPP TS 23.002. Network architecture. — Release 19. — Version 19.0.0. — 3rd Generation Partnership Project, 2025. — URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=728> (дата обращения: 22.09.2026).
8. Рекомендация МСЭ-Т Y.3230 (04/2026). Конвергенция фиксированных, мобильных и спутниковых сетей. Требования и структура обеспечения

качества обслуживания для сетей ИМТ-2020 и последующих поколений. — Женева: Международный союз электросвязи, 2026.

9. Об утверждении Правил применения оборудования, входящего в состав транзитных, оконечно-транзитных и оконечных узлов связи сети фиксированной телефонной связи. Ч. XII. Правила применения местных телефонных станций, использующих технологию коммутации пакетов информации на основе подсистемы передачи мультимедийных сообщений: приказ Минкомсвязи России от 28.03.2011 № 47 (ред. от 23.04.2013); зарегистрирован в Минюсте России 19.04.2011 № 20528. — Текст: электронный // КонсультантПлюс: справ.-правовая система. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_113418/ (дата обращения: 18.09.2026).
10. Сети связи шестого поколения: фрактальные архитектуры, голографические взаимодействия, телеприсутствие, сетевые роботы / А. Е. Кучерявого, А. А. А. А. Давуда, А. Н. Волкова, А. С. А. Мутханны [и др.]. — Москва: Питер, 2024. — 320 с. — ISBN 978-5-4461-4289-7.
11. Нетес, В. А. Ethernet операторского класса: учебное пособие для вузов / В. А. Нетес. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2023. — 128 с. — ISBN 978-5-9912-1023-2.
12. А. В. Росляков. Будущие сети: учебник для вузов / А. П. Пшеничников, А. В. Росляков. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2022. — 256 с. — ISBN 978-5-9912-0972-4.
13. Абделлах, А. Р. Прогнозирование задержки в сетях Интернета вещей и тактильного Интернета с использованием машинного обучения / А. Р. Абделлах, О. А. Махмуд, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2021. — № 1. — С. 23–27. — DOI: 10.34832/ELSV.2021.14.1.002. — EDN: IRYPFV.
14. Пшеничников, А. П. Будущие сети: учебник для вузов / А. П. Пшеничников, А. В. Росляков. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2023. — 256 с. — ISBN 978-5-9912-0972-4.

15. Чукарин, А. В. Бизнес-процессы и информационные технологии в управлении современной инфокоммуникационной компанией / А. В. Чукарин, К. Е. Самуйлов, Н. В. Яркина. — Москва: Альпина Пабlishер, 2016. — 512 с. — ISBN 978-5-9614-5272-3.
16. Соколов, Н. А. Задачи планирования сетей электросвязи: монография / Н. А. Соколов. — Санкт-Петербург: Техника связи, 2012. — 432 с. — ISBN 978-5-905613-05-03.
17. Степанов, С. Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения / С. Н. Степанов. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2015. — 868 с. — (Теория и практика инфокоммуникаций). — ISBN 978-5-9912-0543-6.
18. Шнепс-Шнеппе, М. А. Лекции по сетям связи нового поколения NGN / М. А. Шнепс-Шнеппе. — Москва: МАКС Пресс, 2005. — 230 с. — ISBN 5-317-01290-2.
19. Black, U. D. MPLS and Label Switching Networks / U. D. Black. — Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2002. — 236 p. — ISBN 978-0-13-035819-6.
20. Brun, O. Analytical solution of finite-capacity M/D/1 queues / O. Brun, J.-M. Garcia // Journal of Applied Probability. — 2000. — Vol. 37, no. 4. — P. 1092–1098. — DOI: 10.1239/jap/1014843086.
21. McDysan, D. E. QoS and Traffic Management in IP and ATM Networks / D. E. McDysan. — New York: McGraw-Hill, 2000. — 456 p. — ISBN 978-0-07-134959-8.
22. Minoli, D. High-Density and De-Densified Smart Campus Communications: Technologies, Integration, Implementation, and Applications / D. Minoli, J.-A. Dressendofer. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2022. — 368 p. — ISBN 978-1-119-71605-1. — DOI: 10.1002/9781119716075.
23. Advances in Local Area Networks / J. O. Limb, K. Kummerle, F. A. Tobagi, eds. — New York: IEEE Press, 1987. — 623 p.
24. 3GPP TS 23.002. Network architecture. — Release 19. — Version 19.0.0. — 3rd Generation Partnership Project, 2025. — URL:

<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=728> (дата обращения: 22.09.2026).

- 25.Олифер, В. Г. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — 6-е изд. — Санкт-Петербург: Питер, 2023. — 1008 с. — ISBN 978-5-4461-1426-9.
- 26.Wijnands, I. J. Multipoint LDP Extensions for Multi-Topology Routing: RFC 9658 / I. J. Wijnands, M. Mishra, K. Raza, Z. Zhang, A. Gulko. — Internet Engineering Task Force, 2024. — 14 p. — DOI: 10.17487/RFC9658. — URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9658> (дата обращения: 03.09.2026).
- 27.Рекомендация МСЭ-Т Y.1541 (12/2011). Нормы на сетевые показатели качества для служб на базе протокола IP. Изменение 1 (12/2013). Новое добавление XII. — Женева: Международный союз электросвязи, 2013. — 8 с.
- 28.IEEE Std 1916.1-2025. IEEE Standard for Software Defined Networking and Network Function Virtualization Performance. — New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025. — URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1916.1/6661/> (дата обращения: 08.09.2026).
- 29.Рекомендация МСЭ-Т Y.3300 (06/2014). Структура программно-конфигурируемых сетей. — Женева: Международный союз электросвязи, 2014. — 22 с.
- 30.Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход: в 3 т. / С. Рассел, П. Норвиг; пер. с англ. и ред. А. В. Слепцова. — 4-е изд. — Москва; Санкт-Петербург: Диалектика, 2021. — ISBN 978-5-907365-24-7.
- 31.Big Data: учебное пособие / И. Б. Тесленко, А. М. Губернаторов, О. Б. Дигилина, В. Е. Крылов; Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых. — Владимир: Издательство ВлГУ, 2021. — 123 с. — ISBN 978-5-9984-1425-1.
- 32.Риз, Дж. Облачные вычисления = Cloud Application Architectures: перевод с английского / Дж. Риз ; пер. О. Кокоревой; ред. Е. Кондукова. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. — 288 с.: ил. — ISBN 978-5-9775-0630-4.

- 33.Ли, П. Архитектура Интернета вещей / П. Ли; пер. с англ. М. А. Райтмана. — Москва: ДМК Пресс, 2020. — 454 с. — ISBN 978-5-97060-784-8.
- 34.Сети связи шестого поколения: фрактальные архитектуры, голографические взаимодействия, телеприсутствие, сетевые роботы / А. Е. Кучерявого, А. А. А. А. Давуда, А. Н. Волкова, А. С. А. Мутханны [и др.]. — Москва: Питер, 2024. — 320 с. — ISBN 978-5-4461-4289-7.
- 35.А. В. Росляков. Будущие сети: учебник для вузов / А. П. Пшеничников, А. В. Росляков. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2022. — 256 с. — ISBN 978-5-9912-0972-4.
- 36.Рекомендация МСЭ-Т Y.4500.3 (01/2023). oneM2M. Решения в области безопасности. — Женева: Международный союз электросвязи, 2023. — 276 с.
- 37.Николенко, С. И. Машинное обучение: основы / С. И. Николенко. — Санкт-Петербург: Питер, 2026. — 608 с. — (Библиотека программиста). — ISBN 978-5-4461-4191-3.
- 38.Шваб, К. Четвертая промышленная революция: пер. с англ. / К. Шваб. — Москва: Издательство «Э», 2017. — 208 с.: ил. — ISBN 978-5-699-90556-0.
- 39.Шваб, К. Технологии Четвертой промышленной революции: пер. с англ. / К. Шваб, Н. Дэвис. — Москва: Эксмо, 2018. — 320 с.: ил. — (Top Business Awards). — ISBN 978-5-04-095268-7.
- 40.Рекомендация МСЭ-Т Y.3001 (05/2011). Будущие сети: целевые установки и цели проектирования. — Женева: Международный союз электросвязи, 2011. — 26 с.
- 41.Рекомендация МСЭ-Т Y.3011 (01/2012). Структура виртуализации сетей для будущих сетей. — Женева: Международный союз электросвязи, 2012. — 28 с.
- 42.SI3000 vIMS «Программная платформа комбинированного узла связи (с приложениями) на основе технологии мультисервисных сетей»: техническое описание: запись в реестре № 5968 / АО «Искра Технологии». — Екатеринбург: АО «Искра Технологии» 2024. — 6 с.

43. 3GPP TS 24.229. IP multimedia call control protocol based on Session Initiation Protocol (SIP) and Session Description Protocol (SDP); — Release 20. — Version 20.1.0. — 3rd Generation Partnership Project, 2026. — URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1055> (дата обращения: 12.09.2026).
44. Росляков, А. В. Концепции будущих сетей фиксированной связи и проблемы их практической реализации / А. В. Росляков // Электросвязь. — 2023. — № 10. — С. 10-16. — DOI: 10.34832/ELSV.2023.47.10.001
45. Рекомендация МСЭ-Т Q.1762/Y.2802 (09/2007). Сети последующих поколений. Структура и функциональные модели архитектуры. Общие требования к конвергенции фиксированных и мобильных систем. — Женева: Международный союз электросвязи, 2007. — 29 с.
46. Гольдштейн, А. Б. Технология и протоколы MPLS / А. Б. Гольдштейн, Б. С. Гольдштейн. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. — 304 с. — ISBN 5-8206-0126-2.
47. Алексеев, Е. Б. Пассивные волоконно-оптические сети. Проектирование, оптимизация и обнаружение несанкционированного доступа / Е. Б. Алексеев, И. А. Булавкин, А. Г. Попов, В. И. Попов. — Москва: Медиа Паблишер, 2014. — 206 с. — ISBN 978-5-903650-21-7.
48. Рекомендация МСЭ-Т X.200 (07/1994). Информационные технологии. Взаимодействие открытых систем. Базовая эталонная модель: базовая модель. — Женева: Международный союз электросвязи, 1994. — 59 с.
49. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель. — Москва: Стандартинформ, 2014. — 92 с.
50. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2. Функциональные компоненты безопасности. — Москва: Стандартинформ, 2014. — 164 с.

- 51.ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Компоненты доверия к безопасности. — Москва: Стандартинформ, 2014. — 152 с.
- 52.ГОСТ Р ИСО/МЭК 27033-4-2021. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Безопасность сетей. Часть 4. Обеспечение безопасности межсетевого взаимодействия с использованием шлюзов безопасности. — Москва: Российский институт стандартизации, 2021. — 28 с.
- 53.ГОСТ Р 54713-2011. Звуковое вещание цифровое. Кодирование сигналов звукового вещания с сокращением избыточности для передачи по цифровым каналам связи. MPEG-2, часть VII: усовершенствованное кодирование звука (MPEG-2 AAC). — Москва: Стандартинформ, 2012. — 150 с.
- 54.Рекомендация МСЭ-Т X.200 (07/1994). Информационные технологии. Взаимодействие открытых систем. Базовая эталонная модель: базовая модель. — Женева: Международный союз электросвязи, 1994. — 59 с.
- 55.Пшеничников, А. П. Перспективные инфокоммуникационные технологии и сетевые услуги / А. П. Пшеничников, В. И. Короткова, Л. С. Поскотин // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. — 2023. — Т. 15, № 3. — С. 57–64. — DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-3-57-64.
- 56.Росляков, А. В. Сети фиксированной связи пятого поколения: учебное пособие / А. В. Росляков. — Москва: ИКЦ «Колос-с», 2024. — 232 с. — ISBN 978-5-00129-370-5.
- 57.Дементьев, А. Н. Сети связи: иерархии, транспортные потоки, сигнализация: учебное пособие для вузов / А. Н. Дементьев, С. В. Захаркин, В. А. Иванов. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2025. — 308 с. — ISBN 978-5-9912-1130-7.

- 58.Зингеренко, Ю. А. Пассивные оптические сети xPON: учебное пособие / Ю. А. Зингеренко. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2020. — 115 с. — URL: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/2672.pdf> (дата обращения: 23.09.2026).
- 59.IEEE Std 802.1Q-2022. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Bridges and Bridged Networks / IEEE Standards Association. — 2022. — 2163 с.
- 60.Молодяков, С. А. Применение функций FFmpeg в мультимедийных приложениях: 100 примеров на Python : монография / С. А. Молодяков. — Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. — DOI: 10.18720/SPBPU/2/i23-44. — URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/i23-44.pdf> (дата обращения: 19.09.2026).
- 61.Takagi, H. Analysis of Polling Systems / H. Takagi. — Cambridge, MA: The MIT Press, 1986. — 175 p. — ISBN 978-0-262-20057-8.
- 62.Borst, S. C. Polling Systems / S. C. Borst. — Amsterdam: Stichting Mathematisch Centrum, 1996. — 232 p. — (CWI Tracts ; vol. 115). — ISBN 978-90-6196-467-4.
- 63.Vishnevsky, V. M. Investigation of the Stochastic Polling System and Its Applications to Broadband Wireless Networks / V. M. Vishnevsky, O. V. Semenova, D. T. Bui // Automation and Remote Control. — 2021. — Vol. 82, no. 9. — P. 1607–1613. — DOI: 10.1134/S0005117921090083.
- 64.Вишневский, В. М. Новые модели и методы исследования систем поллинга / В. М. Вишневский, Г. К. Мишкой, О. В. Семенова // Distributed Computer and Communication Networks. Theory and Applications: Proceedings of the International Conference (DCCN-2009, Moscow). — Москва: R&D Company «Information and Networking Technologies», 2009. — С. 79–85.
- 65.Вишневский, В. М. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях / В. М. Вишневский, О. В. Семенова. — Москва: Техносфера, 2007. — 312 с. — ISBN 978-5-94-836166-6.
- 66.Borst, S. C. Polling: past, present, and perspective / S. Borst, O. Boxma // TOP. — 2018. — Vol. 26, No. 3. — P. 335–369. — DOI: 10.1007/s11750-018-0484-5.

67. Vishnevsky, V. Polling Systems and Their Application to Telecommunication Networks / V. Vishnevsky, O. Semenova // *Mathematics*. — 2021. — Vol. 9, no. 2. — Article 117. — 30 p. — DOI: 10.3390/math9020117.
68. Вишневский, В. М. Обзор моделей систем поллинга и их применение в телекоммуникационных сетях. Часть 2 / В. М. Вишневский, О. В. Семенова // *Проблемы информатики*. — 2020. — № 4 (49). — С. 43–70. — DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10015.
69. Семенова, О. В. Методы и алгоритмы анализа моделей массового обслуживания с поллингом, ненадежными обслуживающими приборами и коррелированными потоками: дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 05.13.18 / О. В. Семенова. — Москва, 2022.
70. Winands, E. M. M. Mean value analysis for polling systems / E. M. M. Winands, I. J. B. F. Adan, G. J. van Houtum // *Queueing Systems*. — 2006. — Vol. 54, No. 1. — P. 35–44. — DOI: 10.1007/s11134-006-7898-8.
71. Boxma, O. J. Queue lengths and workloads in polling systems / O. J. Boxma, O. Kella, K. M. Kosiński // *Operations Research Letters*. — 2011. — Vol. 39, No. 6. — P. 401–405. — DOI: 10.1016/j.orl.2011.10.006.
72. Hirayama, T. Analysis of multiclass Markovian polling systems with feedback and composite scheduling algorithms / T. Hirayama // *Annals of Operations Research*. — 2012. — Vol. 198, No. 1. — P. 83–123. — DOI: 10.1007/s10479-011-0910-7.
73. Saffer, Z. Stability of periodic polling system with BMAP arrivals / Z. Saffer, M. Telek // *European Journal of Operational Research*. — 2009. — Vol. 197, No. 1. — P. 188–195. — DOI: 10.1016/j.ejor.2008.06.015.
74. Vis, P. Transient analysis of cycle lengths in cyclic polling systems / P. Vis, R. Bekker, R. D. van der Mei // *Performance Evaluation*. — 2015. — Vol. 91. — P. 303–317. — DOI: 10.1016/j.peva.2015.06.018.
75. Shapira, G. On fairness in polling systems / G. Shapira, H. Levy // *Annals of Operations Research*. — 2022. — Vol. 317, No. 1. — P. 249–271. — DOI: 10.1007/s10479-016-2247-8.

- 76.Вишневский, В. М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневский, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. — Москва: Техносфера, 2005. — 592 с. — ISBN 5-94836-049-0.
- 77.Вишневский, В. М. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях / В. М. Вишневский, О. В. Семёнова. — Москва: Техносфера, 2007. — 312 с. — ISBN 978-5-94836-166-6.
- 78.Saffer, Z. Stability of Periodic Polling System with BMAP Arrivals / Z. Saffer, M. Telek // European Journal of Operational Research. — 2009. — Vol. 197, no. 1. — P. 188–195. — DOI: 10.1016/j.ejor.2008.05.016.
- 79.Калькулятор экспоненты: [Электронный ресурс] // Smart Calculator. — URL: <https://smartcalculator.online/exponential-function-calculator> (дата обращения: 24.09.2026).
- 80.Пшеничников, А. П. Теория телетрафика: учебник для вузов / А. П. Пшеничников. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2017. — 212 с. — ISBN 978-5-9912-0612-9.
- 81.А. В. Росляков. Будущие сети: учебник для вузов / А. П. Пшеничников, А. В. Росляков. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2022. — 256 с. — ISBN 978-5-9912-0972-4.
- 82.Маликова, Е. Е. Расчёт объёма оборудования мультисервисных сетей связи: учебное пособие для вузов / Е. Е. Маликова, А. П. Пшеничников. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2020. — 90 с. — ISBN 978-5-9912-0657-0.
- 83.Пшеничников, А. П. Системы сигнализации в телекоммуникационных сетях: учебное пособие для вузов / А. П. Пшеничников, Е. Е. Маликова. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2025. — 172 с. — ISBN 978-5-9912-1131-4.
- 84.Летников, А. И. Системы сигнализации в сетях с коммутацией каналов и пакетов : учебное пособие для вузов / А. И. Летников, А. П. Пшеничников, Ю. В. Гайдамака, А. В. Чукарин. — Москва: Изд-во МТУСИ, 2008. — 195 с.
- 85.Деарт, В. Ю. Мультисервисные сети связи. Транспортные сети и сети доступа / В. Ю. Деарт. — Москва: Брис-М, 2014. — 189 с.

86. Гольдштейн, Б. С. Инфокоммуникационные сети и системы / Б. С. Гольдштейн. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2019. — 208 с. — ISBN 978-5-9775-4048-3.
87. Росляков, А. В. Сеть 2030: архитектура, технологии, услуги / А. В. Росляков. — Москва: ИКЦ «Колос-с», 2022. — 278 с. — ISBN 978-5-00129-251-7.
88. Лохвицкий, М. С. Мобильная связь: стандарты, структуры, алгоритмы, планирование: учебное пособие / М. С. Лохвицкий, А. С. Сорокин, О. А. Шорин. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2018. — 264 с. — ISBN 978-5-9912-0757-7.
89. Рекомендация МСЭ-T G.1028 (06/2019). Сквозное качество обслуживания для голосовой связи в мобильных сетях 4G. — Женева: Международный союз электросвязи, 2019. — 47 с.
90. Волоконная оптика и измерения в телекоммуникационных системах: учебное пособие для вузов / Э. Л. Портнов, О. В. Колесников, А. Л. Сенявский, Б. П. Хромой. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2023. — 440 с. — ISBN 978-5-9912-1062-1.
91. Будылдина, Н. В. Сетевые технологии высокоскоростной передачи данных: учебное пособие для вузов / Н. В. Будылдина, В. П. Шувалов; под ред. В. П. Шувалова. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2016. — 342 с. — ISBN 978-5-9912-0536-8.
92. Кузовкова, Т. А. Взаимоувязанная система управления цифровым и инфокоммуникационным развитием России: монография / Т. А. Кузовкова, Т. Ю. Салютина. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2022. — 208 с. — ISBN 978-5-9912-1004-1.
93. Агеев, А. И. Управление цифровым будущим / А. И. Агеев // Мир новой экономики. — 2018. — Т. 12, № 3. — С. 6–23. — DOI: 10.26794/2220-6469-2018-12-3-6-23.
94. Бакуменко, Л. П. Международный индекс цифровой экономики и общества (I-DESI): тенденции развития цифровых технологий / Л. П. Бакуменко, Е. А.

- Минина // Статистика и экономика. — 2020. — Т. 17, № 2. — С. 40–54. — DOI: 10.21686/2500-3925-2020-2-40-54.
95. Кузовкова, Т. А. Перспективы развития цифровых услуг интеллектуального мира на основе сетей подвижной связи новых поколений / Т. А. Кузовкова, Е. Е. Девяткин, В. О. Тихвинский, О. И. Шарова // РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. — 2022. — № 2. — С. 80–86.
96. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474. — Текст: электронный // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/view/0001202007210012> (дата обращения: 01.09.2026).
97. Величко, В. В. Телекоммуникационные системы и сети: учебное пособие: в 3 т. Т. 3. Мультисервисные сети / В. В. Величко, Е. А. Субботин, В. П. Шувалов, Е. В. Кокорева; под ред. В. П. Шувалова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2018. — 540 с.
98. Молодяков, С. А. Применение функций FFmpeg в мультимедийных приложениях: 100 примеров на Python: монография / С. А. Молодяков. — Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. — DOI: 10.18720/SPBPU/2/i23-44. — URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/i23-44.pdf> (дата обращения: 19.09.2026).
99. Рекомендация МСЭ-Т Y.1542 (06/2010). Условия для достижения требований к показателям качества сквозной передачи сети IP. — Женева: Международный союз электросвязи, 2010. — 30 с.
100. ГОСТ Р 53536-2009. Цифровое телевидение повышенной четкости. Основные параметры цифровой системы с построчным разложением. Аналоговые и цифровые представления сигналов. Параллельный цифровой интерфейс. — Введ. 2010-12-01. — Москва: Стандартинформ, 2010. — 20 с.
101. Самуйлов, К. Е. Мультисервисные сети связи: учебно-методический комплекс / К. Е. Самуйлов, П. О. Абаев, Ю. В. Гайдамака [и др.]. — Москва: Изд-во РУДН, 2013. — 363 с. — ISBN 978-5-209-05014-8.

102. Рекомендация МСЭ-Т Y.3042 (04/2013). Умные повсеместные сети. Функции интеллектуального управления трафиком и ресурсами. — Женева: Международный союз электросвязи, 2013. — 40 с.
103. ГОСТ Р 53536-2009. Цифровое телевидение повышенной четкости. Основные параметры цифровой системы с построчным разложением. Аналоговые и цифровые представления сигналов. Параллельный цифровой интерфейс. — Введ. 2010-12-01. — Москва: Стандартинформ, 2010. — 20 с.
104. Об утверждении требований к техническим и программным средствам, используемым федеральными органами исполнительной власти и их должностными лицами при организации применения систем видео-конференц-связи и веб-конференции: постановление Правительства Российской Федерации от 30 июня 2025 г. № 984. — Текст: электронный // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202507010033> (дата обращения: 01.09.2026).
105. Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования: приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 25 ноября 2021 г. № 1229: зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 28 февраля 2022 г., № 67548. — Текст: электронный // Официальный интернет-портал правовой информации. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202203010015> (дата обращения: 01.09.2026).

Список публикаций автора по теме диссертации

Список публикаций, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ

106. Короткова В. И. Перспективные инфокоммуникационные технологии и сетевые услуги / А. П. Пшеничников, В. И. Короткова, Л. С. Поскотин // Научные технологии в космических исследованиях Земли. — 2023. — Т. 15, № 3. — С. 57–64. — DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-3-57-64.
107. Короткова, В. И. Оценка задержек при циклическом опросе очередей в мультисервисных узлах доступа / В. И. Короткова, А. П. Пшеничников // Электросвязь. — 2025. — № 1. — С. 29–35. — DOI: 10.34832/ELSV.2025.63.1.005.

Список публикаций в изданиях, индексируемых в международных базах данных WoS и SCOPUS

108. Korotkova V. I. Construction and Analysis of a Model of Group Receipt of IoT Elastic Data in a Wireless Access Node / S. N. Stepanov, V. I. Korotkova, M. G. Kanishcheva, A. P. Pshenichnikov // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of On-Board Communications (SOSG). — Moscow, 2023. — P. 461-467. — DOI: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10091982.
109. Korotkova V. I. The Mathematical Model of a Multiservice Access Node in the Private LTE Network / M. S. Stepanov, T. Dawood, V. I. Korotkova, A. P. Smirnov, L. S. Poskotin // 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of On-Board Communications (SOSG). — Moscow, 2024. — P. 443-451. — DOI: 10.1109/IEEECONF61479.2024.10496731.

Список публикаций, включённых в базу РИНЦ

110. Короткова В. И. Виртуальная мультимедийная подсистема vIMS / А. П. Пшеничников, В. И. Короткова, А. М. Бикчурин // Телекоммуникационные и вычислительные системы : юбилейный сборник трудов XXX Международного научно-технического форума. — Москва, 2022. — С. 90–94.
111. Короткова В. И. Интеллектуальная транспортная система на основе Интернета вещей / Ш. И. Исобоев, А. П. Пшеничников, В. И. Короткова // Телекоммуникационные и вычислительные системы: юбилейный сборник

трудов XXX Международного научно-технического форума. — Москва, 2022. — С. 84–89.

112. Короткова В. И. Технологическая архитектура мультисервисной распределённой корпоративной сети связи / О. А. Слатина, В. И. Короткова, А. П. Пшеничников // Телекоммуникации и информационные технологии. — 2023. — Т. 10, № 1. — С. 145–154.
113. Короткова В. И. Технологии и протоколы туннелирования в инфокоммуникационных сетях / С. А. Козлов, Д. А. Кулагин, В. И. Короткова // Телекоммуникации и информационные технологии. — 2024. — Т. 11, № 2. — С. 11–19.
114. Короткова, В. И. Функциональная модель сети доступа мультисервисной сети связи / В. И. Короткова, К. Ю. Новодерёжкин, А. П. Пшеничников // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2025. — Т. 16, № 2. — С. 15–22.
115. Короткова, В. И. Метод оценки задержек пакетов сообщений в мультисервисных узлах доступа / В. И. Короткова, А. П. Пшеничников, М. А. Ярыгин // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2026. — № 1. — С. 27–37.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

116. Программа для оценки задержек пакетов в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа на языке программирования Python: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614150 / В. И. Короткова, А. П. Пшеничников, М. А. Ярыгин; правообладатель — Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» — Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12 февраля 2026 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Акты о практической реализации результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе МТУСИ



Краснов Е.В.

«19» февраля 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования Коротковой Виктории Игоревны в учебном процессе Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики»

Результаты диссертационного исследования по теме: «Разработка метода оценки задержек пакетов сообщений в очередях коммутаторов мультисервисных сетей доступа» по научной специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций, выполненной на кафедре «Сетей связи и систем коммутации» (ССиСК), использованы в учебном процессе на кафедре ССиСК. (Решения кафедры ССиСК, протокол №6 от «19» февраля 2026 г.)

Указанные результаты в виде программного комплекса используются при проведении лабораторного практикума по дисциплине:

«Телеграфический мультисервисных сетей»

(подписание дисциплины)

Направление подготовки 11.03.02 - «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Председатель комиссии

Степанов С.Н.

«19» 01 2026 г.

Секретарь кафедры

Канищева М.Г.

«19» 01 2026 г.

Доцент кафедры

Маликова Е.Е.

«19» 01 2026 г.



СИГНАЛТЕК

ОГРН 1117746741210, ИНН 7722756624, КПП 771601001,

129344, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Бабушкинский, улица Искры, дом 31, корпус 1, помещение 21Ч,
+7(495)150-42-55

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Сигналтек»

Алясев А.А.

«26» августа 2026 г.

М.П.

АКТ

О реализации результатов диссертационной работы Коротковой В.И. на тему: «Разработка метода оценки задержек пакетов сообщений в очередях коммутаторов мультисервисных сетей доступа», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Применение в работе методов теории телетрафика и анализа средних длин очередей для систем опроса в мультисервисных узлах представляют научную новизну и показывают высокий уровень подготовки соискателя.

Разработанный метод оценки задержки при циклическом опросе очередей реализован в виде программы для ЭВМ на языке программирования Python с прилагающейся подробной инструкцией по работе.

Программа, разработанная Коротковой В.И., рекомендуется к применению для моделирования поведения сетевого оборудования: коммутаторов мультисервисных узлов доступа и мониторинга сквозных параметров качества обслуживания пакетов в мультисервисных сетях связи (*End-to-end QoS*) в соответствии с рекомендацией МСЭ-T G.114 (05/2003), а также при проектировании схожих типов оборудования и программного обеспечения.

Директор по инновациям и
стратегии АО «Сигналтек»

Д.С. Сахарчук

«26» августа 2026 г.

1

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Газпром телеком», к.т.н.



Н. Г. Кузьменко

« 14 » 03 2026 г.

М.П.

В Диссертационный совет 55.2.002.01 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском техническом университете связи и информатики»

Акт внедрения

результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук Коротковой Виктории Игоревны на тему: «Разработка метода оценки задержек пакетов сообщений в очередях коммутаторов мультисервисных сетей доступа», по научной специальности 2.2.15 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Комиссия в составе:

Ваннер Юрий Александрович - заместитель генерального директора

ООО «Газпром телеком» - председатель комиссии;

Будько Андрей Николаевич - начальник Управления по развитию сети связи - член комиссии;

Кузнецова Ирина Владимировна - начальник отдела - член комиссии,

рассмотрела предложенный метод оценки задержек пакетов сообщений в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа, реализованный в виде программного продукта на языке программирования *Python* для ЭВМ типа *IBM PC*, функционирующей под операционной системой *GNU/Linux*.

В представленном материале отмечено, что средняя величина задержки в 100 мс между интерфейсами «пользователь-сеть» на исходящей и входящей сторонах соединительного тракта определена в рекомендации МСЭ-Т Y.1541. При сквозной передаче от «говорящего до слушающего» в мультисервисной сети связи к значению этой нормированной величины добавляются задержки в исходящем и входящем узлах доступа.

По рекомендациям МСЭ-Т G.114 по значению односторонней задержки «из конца в конец» («*End-to-End QoS*») при международной телефонной связи от абонента А до абонента Б выделено четыре уровня качества связи:

- первый уровень — до 150 мс — отличное качество связи;
- второй уровень — до 200 мс — хорошее качество связи;
- третий уровень — до 400 мс — приемлемое качество связи;
- четвёртый уровень — свыше 450 мс — плохое качество связи.

В исходящем узле доступа длительность пакетирования, инкапсуляции в дейтаграмму и постановки в очередь голосовых пакетов составляет в среднем 40 мс. К этому значению необходимо добавить величину задержки голосовых пакетов в очереди ($t_{\text{ож.оч.}} = 15-20$ мс) в процессе циклического обслуживания (поллинга) сервером всех приоритетных очередей узла доступа.

Во входящем узле доступа длительность обратного преобразования пакетов в сообщение составляет 40 мс и в среднем 25 мс в джиттер-буфере.

Величина задержки голосовых сообщений от «говорящего к слушающему» даже при минимальной задержки голосовых пакетов в очереди составляет $100+80+25+15 = 2020$ мс, что может приводить к медленным и прерывистым разговорам, шумам, к нарушению синхронизации между голосом и другими данными во время видеоконференций. Из этого следует актуальность решения задачи оценки задержек голосовых пакетов в очереди пакетного коммутатора узла доступа.

Разработанный метод оценки задержек пакетов сообщений учитывается при проектировании мультисервисных узлов доступа и при мониторинге задержек голосовых сообщений в мультисервисных сетях связи.

Заместитель генерального директора
ООО «Газпром телеком»


« 10 » 03 2026 г.

Начальник Управления развития
сети связи


« 10 » 03 2026 г.

Начальник отдела


« 10 » 03 2026 г.

Приложение Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026614150

Программа для оценки задержек пакетов в очередях коммутаторов мультисервисных узлов доступа на языке программирования Python

Правообладатель: *Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (RU)*

Авторы: *Короткова Виктория Игоревна (RU), Пшеничников Анатолий Павлович (RU), Ярыгин Михаил Александрович (RU)*

Заявка № **2026610553**

Дата поступления **15 января 2026 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **12 февраля 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



ЭЦП
документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a570a4f74c3d531b4a86818e75129506
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.07.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов